



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Tecnología de la Construcción

Monografía

**SOFTWARE PARA DISEÑO DE CABEZALES DE PILOTES DE CONCRETO
REFORZADO MEDIANTE EL MÉTODO PUNTAL-TENSOR, CONFORME CON
EL CÓDIGO ACI 318-19.**

Para optar al título de ingeniero civil

Elaborado por

Br. Danny Josué Guido Benavides

Br. Milton Eudieg Castellón Ortiz

Tutor

MSc.Ing. Yader Andrés Jarquín Montalván

Asesor

Ing. Willy David Gutiérrez Aldana

Managua, Diciembre 2020

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, dar gracias a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra carrera, ser el apoyo de fortaleza en aquellos momentos de dificultad, debilidad y enfermedad.

Gracias a nuestros padres y madre por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

Agradecer a nuestro tutor MSc.Ing. Yader Andrés Jarquín Montalván por haber aceptado ser parte de nuestra carrera universitaria brindando gran parte de su valioso tiempo para ayudarnos en nuestro trabajo monográfico.

A nuestros docentes de la Universidad Nacional de Ingeniería por compartir sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión, de manera especial a nuestro asesor Ing. Willy David Gutiérrez Aldana quien nos brindó su apoyo y dedicación.

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios por ser el inspirador y darnos la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados en nuestras vidas.

A nuestros padres y madres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes que nos han inculcado muy buenos valores hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que hoy somos.

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos/as que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Resumen General

La presente investigación titulada “*SOFTWARE PARA DISEÑO DE CABEZALES DE PILOTES DE CONCRETO REFORZADO MEDIANTE EL MÉTODO PUNTAL-TENSOR, CONFORME CON EL CÓDIGO ACI 318-19*”, se realizó con el objetivo de motivar a investigaciones futuras que conlleven a un estudio más a fondo del método, así como también su aplicación en los diferentes elementos estructurales de concreto reforzado.

En el primer capítulo se muestran los antecedentes en donde podemos conocer a cerca del origen del método, sus creadores y la evolución que este ha tenido a lo largo de los años, de igual manera su aparición en los códigos internacionales de diseño. También se justifica la necesidad de un software capaz de desarrollar esta metodología y convertirse en una herramienta eficiente para el diseño estructural.

En el segundo capítulo se encuentra toda la información recopilada de investigaciones sobre las cimentaciones profundas, en especial cimentaciones con pilotes, su clasificación, funciones y usos, así mismo los cabezales de pilotes, de igual manera, se aborda todos los fundamentos acerca de la aplicación del método puntal-tensor en las estructuras y las principales consideraciones que se especifican en el código ACI 318-19.

En el tercer capítulo abordamos todo lo relacionado al entorno de desarrollo de Visual Studio 2012 y un breve resumen del proceso de creación del software Pile Cap Design “PCD”.

Finalmente, en el penúltimo y último capítulo se muestra la validación del software desarrollado mediante la comparación de resultados realizados manualmente y con el software Pile Cap Design “PCD”.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS	ii
LISTA DE SIMBOLOS	iii

CAPÍTULO I: DISPOSICIONES GENERALES

1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	<i>5</i>
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	<i>5</i>

CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO PUNTAL-TENSOR Y REQUERIMIENTOS, SEGÚN ACI 318-19

2.1. Generalidades	6
2.1.1. <i>Cimentaciones profundas.....</i>	<i>6</i>
2.1.2. <i>Parámetros que afectan la transmisión de carga al suelo.....</i>	<i>6</i>
2.1.3. <i>Capacidad portante del suelo.....</i>	<i>6</i>
2.1.4. <i>Factores que afectan la capacidad portante de un suelo.....</i>	<i>7</i>
2.1.5. <i>Cimentaciones con pilotes.....</i>	<i>7</i>
2.1.6. <i>Tipos de pilotes</i>	<i>8</i>
2.1.7. <i>Clasificación de los pilotes según su funcionamiento</i>	<i>13</i>
2.1.8. <i>Funciones y usos de los pilotes.....</i>	<i>14</i>
2.1.9. <i>Cabezales de pilotes</i>	<i>16</i>
2.1.10. <i>Hipótesis fundamentales para el análisis de los cabezales.....</i>	<i>17</i>
2.2. Principios del método Puntal-Tensor	18
2.2.1. <i>Principio de Saint Venant</i>	<i>18</i>
2.2.2. <i>Regiones continuas (Región B).....</i>	<i>18</i>
2.2.3. <i>Regiones discontinuas (Región D)</i>	<i>19</i>
2.3. Método Puntal-Tensor.....	21
2.3.1. <i>Definición general.....</i>	<i>21</i>
2.3.2. <i>Geometría de la retícula.....</i>	<i>21</i>
2.3.3. <i>Puntales</i>	<i>28</i>
2.3.4. <i>Tensores</i>	<i>35</i>
2.3.5. <i>Nodos y zonas nodales</i>	<i>38</i>

CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL SOFTWARE “Pile Cap Design (PCD)” CON VISUAL STUDIO 2012

3.1. Microsoft Visual Studio	44
3.1.1. Microsoft .NET	44
3.1.2. Principales componentes del marco de trabajo	45
3.1.3. Descripción de los componentes	45
3.2. Visual Basic .NET	46
3.2.1. Lenguaje de programación orientado a objetos	46
3.2.2. Características	47
3.3. Desarrollo del software “Pile Cap Design (PCD)”	48
3.3.1. Análisis	48
3.3.2. Diseño	48
3.3.3. Programación del código fuente	52
3.3.4. Prueba del software	53
3.3.5. Instalación	53
3.4. Ventajas y desventajas de Pile Cap Design “PCD”	54
3.4.1. Ventajas	54
3.4.2. Desventajas	55
3.5. Manual de usuario	56
3.5.1. Instalación del software	57
3.5.2. Requisitos de Instalación	60
3.5.3. Interfaz principal	61
3.5.4. Pasos para la creación de un nuevo proyecto	65
3.5.5. Visualización de resultados	68
3.5.6. Diseño	71

CAPÍTULO IV: VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL SOFTWARE “Pile Cap Design (PCD)”

4.1. Ejemplos de diseño	74
4.1.1. Ejemplo de cabezal de 4 pilotes sometido a carga axial	74
4.1.2. Ejemplo de cabezal de 4 pilotes sometido a carga axial y momento	96
4.1.3. Ejemplo de cabezal de 5 pilotes sometido a carga axial	120
4.1.4. Ejemplo de cabezal de 5 pilotes sometido a carga axial y momento	124
4.1.5. Ejemplo de cabezal de 3 pilotes sometido a carga axial	128

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.....	132
5.2. Recomendaciones.....	133
6. Bibliografía	134

ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1.* Hincado de pilotes de hormigón prefabricados.
- Figura 2.2.* Tipos de pilotes según el material.
- Figura 2.3.* Pilotes precolados con refuerzo ordinario.
- Figura 2.4.* a) y b) Pilotes de carga de punta; c) pilotes de fricción.
- Figura 2.5.* Cabezal apoyado sobre cuatro pilotes.
- Figura 2.6.* Distribución de esfuerzos según la teoría de Saint-Venant.
- Figura 2.7.* Localización de regiones B y D dentro de una estructura.
- Figura 2.8.* Regiones con discontinuidad geométrica seccionada.
- Figura 2.9.* Discontinuidad estática por cargas puntuales.
- Figura 2.10.* Casos de discontinuidad generalizada.
- Figura 2.11.* Resolución de las fuerzas en una zona nodal.
- Figura 2.12.* Algunas opciones del modelo puntal tensor.
- Figura 2.13.* Caminos de carga y modelo puntal-tensor.
- Figura 2.14.* Caminos de carga incluyendo una “vuelta en U” y modelo puntal-tensor.
- Figura 2.15.* Estructura con sus trayectorias de esfuerzo elásticas, diagramas de esfuerzos elásticos y el modelo puntal–tensor creado.
- Figura 2.16.* Tipos de puntales a compresión.
- Figura 2.17.* Refuerzo distribuido que cruza puntales interiores.
- Figura 2.18.* Refuerzo que atraviesa un puntal.
- Figura 2.19.* Longitud de anclaje en tensores.
- Figura 2.20.* Tipos de nodos según las fuerzas concurrentes.
- Figura 2.21.* Zona nodal hidrostática y no hidrostática.
- Figura 2.22.* Zonas nodales hidrostáticas.
- Figura 2.23.* Distribución de acero de tensor en zonas nodales.
- Figura 3.1.* Diagrama de flujo para la creación de PCD.
- Figura 3.2.* Interfaz de PCD (MDIParent).
- Figura 3.3.* Algunos controles usados en PCD.
- Figura 3.4.* Lenguaje de VisualBasic.net (Revisión de zonas nodales).
- Figura 3.5.* Creación del instalador de PCD con la herramienta InstallShield.

- Figura 3.6.* Inclusión de referencias de PCD en el Disco Local C.
- Figura 3.7.* Proceso de instalación del software.
- Figura 3.8.* Continuación del proceso de instalación del software.
- Figura 3.9.* Ventana principal.
- Figura 3.10.* Barra de accesos directos.
- Figura 3.11.* Menús desplegables.
- Figura 3.12.* Menú ARCHIVO.
- Figura 3.13.* Menú DEFINIR.
- Figura 3.14.* Menú VER.
- Figura 3.15.* Menú CONVERSION.
- Figura 3.16.* Menú AYUDA.
- Figura 3.17.* Proceso inicial de un nuevo proyecto.
- Figura 3.18.* Modelo para cabezal de 4 pilotes.
- Figura 3.19.* Definición de materiales.
- Figura 3.20.* Definición de cargas.
- Figura 3.21.* Proceso de análisis.
- Figura 3.22.* Clasificación de miembros y sus valores de fuerzas.
- Figura 3.23.* Verificación de puntales.
- Figura 3.24.* Verificación de zonas nodales.
- Figura 3.25.* Iniciar diseño.
- Figura 3.26.* Refuerzo para tensores.
- Figura 3.27.* Refuerzo por contracción y temperatura.
- Figura 4.1.* Dimensiones del cabezal.
- Figura 4.2.* Modelo puntal – tensor para el ejemplo de diseño, a) vista del eje X, b) vista del eje Y.
- Figura 4.3.* Modelo puntal – tensor, a) nodos, b) miembros.
- Figura 4.4.* Transferencia de fuerza en dirección X.
- Figura 4.5.* Transferencia de fuerza en dirección Y.
- Figura 4.6.* Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nudo A.
- Figura 4.7.* Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nudo E.
- Figura 4.8.* Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nudo A.

- Figura 4.9.* Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo F.
- Figura 4.10.* Proceso inicial para ingreso de datos.
- Figura 4.11.* Ventana geometría del cabezal.
- Figura 4.12.* Vista lateral y en 3D.
- Figura 4.13.* Ventana para definición de materiales.
- Figura 4.14.* Ventana de definición de cargas y ubicación de ellas mismas.
- Figura 4.15.* Análisis.
- Figura 4.16.* Fuerza en cada barra.
- Figura 4.17.* Valores de demanda capacidad para cada puntal.
- Figura 4.18.* Valores de demanda capacidad para la zona nodal.
- Figura 4.19.* Diseño del acero para tensores.
- Figura 4.20.* Dimensiones del cabezal.
- Figura 4.21.* Modelo puntal – tensor para el ejemplo de diseño, a) vista del eje X, b) vista del eje Y.
- Figura 4.22.* Modelo puntal – tensor, a) nodos, b) miembros.
- Figura 4.23.* Transferencia de fuerza en dirección X.
- Figura 4.24.* Transferencia de fuerza en dirección Y.
- Figura 4.25.* Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo A.
- Figura 4.26.* Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo B.
- Figura 4.27.* Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo E.
- Figura 4.28.* Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo B.
- Figura 4.29.* Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo A.
- Figura 4.30.* Proceso inicial para ingreso de datos.
- Figura 4.31.* Ventana geometría del cabezal.
- Figura 4.32.* Vista lateral y en 3D.
- Figura 4.33.* Ventana para definición de materiales.
- Figura 4.34.* Ventana de definición de cargas y ubicación de ellas mismas.
- Figura 4.35.* Análisis.
- Figura 4.36.* Fuerza en cada barra.
- Figura 4.37.* Valores de demanda capacidad para cada puntal.
- Figura 4.38.* Valores de demanda capacidad para la zona nodal.

Figura 4.39. Diseño del acero para tensores.

Figura 4.40. Dimensiones del cabezal.

Figura 4.41. Dimensiones del cabezal.

Figura 4.42. Dimensiones del cabezal.

LISTA DE TABLAS

- Tabla 2.1. *Coeficientes de puntal β_s*
- Tabla 2.2. *Factor de modificación del confinamiento de los puntales y nodos β_c*
- Tabla 2.3. *Refuerzo mínimo distribuido*
- Tabla 2.4. *Coeficientes de la zona nodal β_n*
- Tabla 4.1. *Datos de materiales.*
- Tabla 4.2. *Solicitaciones actuantes.*
- Tabla 4.3. *Fuerzas en puntales y tensores en el eje X.*
- Tabla 4.4. *Fuerzas en puntales y tensores en el eje Y.*
- Tabla 4.5. *Resistencia efectiva de los puntales.*
- Tabla 4.6. *Comparación de valores de fuerza en los miembros obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.7. *Comparación de los porcentajes de D/C de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.8. *Comparación de los porcentajes de las zonas nodales de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.9. *Comparación de las áreas de acero obtenidas en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.10. *Datos de materiales.*
- Tabla 4.11. *Solicitaciones actuantes.*
- Tabla 4.12. *Fuerzas en puntales y tensores en el eje X.*
- Tabla 4.13. *Fuerzas en puntales y tensores en el eje Y.*
- Tabla 4.14. *Resistencia efectiva de los puntales.*
- Tabla 4.15. *Comparación de valores de fuerza en los miembros obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.16. *Comparación de los porcentajes de D/C de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.17. *Comparación de los porcentajes de las zonas nodales de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.18. *Comparación de las áreas de acero obtenidas en “PCD” y de forma manual.*

- Tabla 4.19. *Datos de materiales.*
- Tabla 4.20. *Solicitaciones actuantes.*
- Tabla 4.21. *Comparación de valores de fuerza en los miembros obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.22. *Comparación de los porcentajes de D/C de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.23. *Comparación de los porcentajes de las zonas nodales de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.24. *Comparación de las áreas de acero obtenidas en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.25. *Datos de materiales.*
- Tabla 4.26. *Tabla 4.26. Solicitaciones actuantes.*
- Tabla 4.27. *Comparación de valores de fuerza en los miembros obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.28. *Comparación de los porcentajes de D/C de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.29. *Comparación de los porcentajes de las zonas nodales de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.30. *Comparación de las áreas de acero obtenidas en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.31. *Datos de materiales.*
- Tabla 4.32. *Solicitaciones actuantes.*
- Tabla 4.33. *Comparación de valores de fuerza en los miembros obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.34. *Comparación de los porcentajes de D/C de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.35. *Comparación de los porcentajes de las zonas nodales de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.*
- Tabla 4.36. *Comparación de las áreas de acero obtenidas en “PCD” y de forma manual.*

Lista de símbolos

f_t : Fuerza en el tensor (Ec. 2-01)

l_t : Longitud del tensor (Ec. 2-01)

F_u : Fuerza en el puntal que actúa en el nodo debido a las cargas factorizadas (Ec. 2-02)

F_n : Resistencia nominal del elemento (Ec. 2-02)

f_{ns} : Resistencia nominal de un puntal (Ec. 2-03, 2-04)

φ : Factor de reducción de resistencia (Ec. 2-03, 2-04, 2-05, 2-07)

f_{ce} : Resistencia efectiva del concreto en el puntal (Ec. 2-03, 2-05, 2-10, 2-11, 2-12)

A_{cs} : Área de la sección transversal al final del puntal que se está considerando (Ec. 2-03, 2-04)

A'_s : Área del refuerzo de compresión a lo largo de la longitud del puntal (Ec. 2-04)

f'_s : Tensión en el refuerzo de compresión a la fuerza axial nominal del puntal (Ec. 2-04)

β_c : Factor de modificación del confinamiento de los puntales y nodos (Ec. 2-05, 2-12)

β_s : Coeficiente de puntal (Ec. 2-05)

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto en los puntales (Ec. 2-05, 2-07, 2-12)

λ_s : Factor de modificación del efecto de tamaño (Ec. 2-06, 2-07)

d : Peralte efectivo de la sección transversal (Ec. 2-06, 2-07)

V_u : Fuerza cortante última (Ec. 2-07)

λ : Factor de corrección para concreto de peso ligero (Ec. 2-07)

b_w : Ancho del alma (Ec. 2-07)

f_{nt} : Resistencia nominal a tracción de los tensores (Ec. 2-08, 2-10)

A_{ts} : Área de refuerzo sin pre-esfuerzo en un tensor (Ec. 2-08)

f_y : Esfuerzo normal en el acero (Ec. 2-08)

A_{tp} : Área de acero pre-esforzado en un tensor, para miembros no pretensados su valor será cero (*Ec. 2-08, 2-09*)

Δf_p : Incremento en el esfuerzo para acero pre-esforzado debido a cargas factorizadas (*Ec. 2-08, 2-09*)

f_{se} : Esfuerzo efectivo en el refuerzo pre-esforzado después de las pérdidas (*Ec. 2-09*)

$w_{t,m\acute{a}x}$: Ancho máximo efectivo del tensor (*Ec. 2-10*)

b_s : Ancho del puntal (*Ec. 2-10*)

F_{nn} : Resistencia nominal de la zona nodal (*Ec. 2-11*)

A_{nz} : Área de cada cara de zonas nodales (*Ec. 2-11*)

β_n : Coeficiente de zona nodal (*Ec. 2-12*)

W_s : Ancho del puntal en forma de botella (*Figura. 2-18*)

l_{anc} : Longitud de anclaje del refuerzo (*Figura. 2-19*)

CAPITULO I

DISPOSICIONES GENERALES

1.1. Introducción

En campos tan grandes como los que abarca la Ingeniería Civil y gracias a la tecnología con la que se cuenta hoy en día, sería muy extraño decir que no existe un software especializado en ayudarle al ingeniero civil a obtener resultados acertados, exactos y cercanos a la realidad, de manera ágil y veloz, ahorrando el tiempo necesario en el cual, se tuviera que solucionar el problema.

En el área de la ingeniería estructural hay mayor demanda de software en comparación con las otras especialidades de la ingeniería, esto radica en la complejidad de los cálculos y procesos matemáticos en ejecución. En el caso de las cimentaciones, los más conocidos son: SAFE, GEO5, ADAPT-MAT, STAAD FOUNDATION entre otros. Cada uno de ellos aplica los procedimientos estandarizados de diseño los cuales se rigen por normas internacionales.

Por otra parte, existe un método generalizado para el diseño de elementos estructurales de concreto reforzado, como lo es el método Puntal-Tensor en el cual actualmente forma parte del código ACI 318-19, en su capítulo 23. Este es el método ideal para aplicarse en el diseño de cabezales de pilotes en cimentaciones profundas ya que exige mayor espesor y acero de refuerzo debido a que se analizan todo tipo de discontinuidades, dando una mayor seguridad a la estructura; a diferencia del método convencional que no debe usarse ya que no cumple con la hipótesis de Bernoulli.

En esta investigación se abordará toda la teoría que concierna al método Puntal-Tensor, aplicado al diseño de cabezales en cimentaciones profundas, lo cual servirá para la formulación de algoritmos que posteriormente serán traducidos a un lenguaje de programación como lo es Visual Basic, esto con el objetivo de desarrollar un nuevo software en el cual se diseñe con el método antes mencionado, marcando la diferencia con los demás softwares que aplican únicamente los métodos convencionales.

1.2. Antecedentes

En los años 80's los ingenieros Collins y Mitchell consideraron las deformaciones del modelo de armadura y derivaron un método del diseño racional por corte y torsión, denominándolo con el nombre de Puntal- Tensor, en el cual demostraron que puede aplicarse en vigas aperaltadas y en voladizo. A partir de eso los ingenieros Schlaich y Schäfer en el año 1987, empezaron sus esfuerzos para expandir sistemáticamente este método a estructuras completas y a todo tipo de estructuras (Reyes, 2014).

Diversos códigos han tomado este método como una herramienta de diseño, entre ellos tenemos: la norma de la asociación de hormigón canadiense, el instituto americano de concreto comité 318 del 2002, el Eurocódigo de 1992, la asociación americana de estado de carreteras y transporte oficial AASTHO 2007, el código colombiano 2010, entre otros.

Debido al gran campo de aplicación del método Puntal-Tensor era de esperar su aplicación en softwares, de los cuales CAST "Computers Aided Strut and Tie" fue el primero en utilizarlo, este fue desarrollado en otoño de 1998 en la Universidad de Illinois. Así mismo existen otros softwares como el Fachwerk creado en 2010 por el ingeniero Adrian Voltobel, y este solo utiliza condiciones de equilibrio, desprecia el comportamiento elástico del material. Secuencialmente surgió AStrutTie creado en el 2014 por la empresa desarrolladora de software para ingeniería. También STDS "Strut & Tie desing software", para el diseño de vigas aperaltadas, desarrollado por estudiantes nicaragüenses de la Universidad Nacional de Ingeniería en 2019.

1.3. Justificación

El método puntal - tensor (Strut & Tie por sus palabras en inglés) es una herramienta práctica para el diseño de elementos de concreto reforzado, propuesto por diferentes investigadores en los años 80's. Sin embargo, con la finalidad de evaluar la aplicación de este método, el comité 318 del ACI llevó a cabo una investigación experimental y analítica con diferentes configuraciones estructurales, encontrando al método puntal tensor como una aplicación adecuada para estimar la capacidad de las estructuras sometidas a flexión, cortante y torsión (Beltrán & Peña, 2018).

En los últimos años, dicha metodología ha sido incluido en muchos códigos internacionales como una herramienta de análisis y diseño de estructuras de concreto reforzado. Sin embargo, en la actualización del reglamento nacional de la construcción (CR-001, RNC-16) se menciona, pero sin estar incluido en el documento.

Por otra parte, para la ingeniería los softwares constituyen una herramienta muy funcional, puesto que en todas las áreas o campos de dicha ciencia se pueden utilizar con una cantidad de ventajas y bondades extraordinarias, desde su aplicación en la ingeniería no se han dejado de utilizar en forma correcta y racional.

Por lo cual, en esta investigación se presentará el desarrollo de un software que aplique el método puntal -tensor, si bien es cierto, existen diversos softwares que permiten el diseño de estructuras pero la mayoría de estos se rigen con la aplicación de elementos finitos, lo cual demanda una gran capacidad de procesador, tienen mayor complejidad en sus diseños de interfaces en las diferentes etapas de diseño lo que requiere mayor práctica; por tal motivo son softwares que están dirigidos principalmente para diseñadores experimentados y poco recomendados para principiantes.

Esta investigación aportará una herramienta versátil, con una interfaz sencilla lo que facilitará su manejo, aportando una gran automatización y precisión al realizar

los diseños, y una interpretación de resultados entendible y ordenada mediante una memoria de cálculo, de igual manera brindando al usuario un aporte teórico que constará con una base de datos alusivos al método, sin exigir demasiados requisitos del ordenador como el procesador, tarjeta gráfica, sistema operativo entre otros, permitiendo al usuario realizar el proceso de cálculo y diseño específicamente de cabezales de pilotes con mayor velocidad.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Desarrollar un software para diseño de cabezales de pilotes de concreto reforzado mediante el método puntal-tensor, conforme con el código ACI 318-19.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Describir los fundamentos teóricos y requerimientos del método puntal-tensor en el diseño de cabezales de pilotes.
- Mostrar el proceso de desarrollo del software en el lenguaje de Visual Basic.
- Validar el software mediante una comparación de resultados con ejemplos manuales y con software.

CAPITULO II

*FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO
PUNTAL-TENSOR Y REQUERIMIENTOS, SEGÚN
ACI 318-19*

2.1. Generalidades

2.1.1. Cimentaciones profundas

Las cimentaciones profundas son un tipo de cimentaciones que solucionan la transmisión de cargas a los estratos aptos y resistentes del suelo. Por lo que su utilización se opta cuando los esfuerzos transmitidos por la carga no pueden ser distribuidos suficientemente a través de una cimentación superficial, y en la solución probable se sobrepasa la capacidad portante del suelo. El diseño de las cimentaciones con pilotes o cimentaciones profundas es considerado un arte en vista de las incertidumbres implícitas al trabajar con las condiciones del subsuelo (Rodríguez, 2013).

2.1.2. Parámetros que afectan la transmisión de carga al suelo

La función de una fundación es la de transmitir al suelo todas las cargas que impone la superestructura depende de una gran diversidad de parámetros, entre los cuales, según Fratelli (1993), se pueden mencionar:

- La capacidad portante del suelo de fundación
- La profundidad en la cual se ubica la base
- El tipo y magnitud de las cargas impuestas
- Las propiedades elásticas del suelo
- La rigidez y tamaño de la fundación
- El comportamiento de la superestructura
- La presencia del nivel freático.

2.1.3. Capacidad portante del suelo

Según Das (2012), se denomina capacidad portante a la capacidad del terreno para soportar las cargas aplicadas sobre él; es la máxima presión media de contacto entre la cimentación y el terreno tal que no se produzcan fallas por cortante del suelo o un asentamiento diferencial excesivo. Por lo tanto, la capacidad portante admisible debe estar basada en uno de los siguientes criterios funcionales:

- Si la función del terreno de cimentación es soportar una determinada tensión independientemente de la deformación, la capacidad portante se denominará carga de hundimiento.
- Si lo que se busca es un equilibrio entre la tensión aplicada al terreno y la deformación sufrida por este, deberá calcularse la capacidad portante a partir de criterio de asiento admisible.

2.1.4. Factores que afectan la capacidad portante de un suelo

La capacidad portante de un suelo puede verse afectada por numerosos factores, en Fratelli (1993) se mencionan los siguientes:

- La retracción y expansión del suelo
- La proximidad del nivel freático
- Los defectos o fallas del subsuelo
- La erosión y corrosión en el suelo
- A la aplicación de cargas inclinadas o excéntricas
- La proximidad de las bases a laderas
- La excesiva cercanía entre bases o en linderos
- La licuefacción por la acción de cargas dinámicas

2.1.5. Cimentaciones con pilotes

Los pilotes son miembros estructurales de gran esbeltez, con sección transversal circular o poligonal, que penetran en suelos de baja capacidad portante a fin de transmitir las cargas a niveles más profundos del subsuelo. Los pilotes están hechos de acero, concreto o madera, cuestan más que las cimentaciones superficiales, pero a pesar de su costo, el uso de pilotes con frecuencia es necesario para asegurar la seguridad estructural (Das, 2012).



Figura 2.1 Hincado de pilotes de hormigón prefabricados (Fuente: Chantelot & Mathern, 2010, pág. 3).

2.1.6. Tipos de pilotes

En el trabajo de construcción se utilizan diferentes tipos de pilotes, dependiendo del tipo de carga que soportarán, de las condiciones del subsuelo y de la ubicación del nivel freático.

En Das (2012), se indica que los pilotes se pueden dividir en las categorías siguientes:

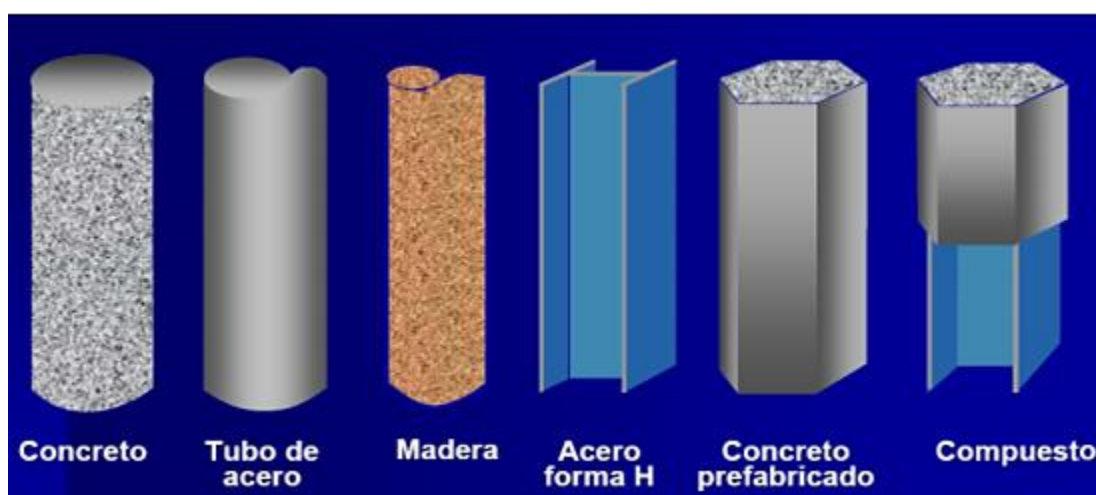


Figura 2.2 Tipos de pilotes según el material (Fuente: Arregui, 2010, pág. 6).

a) Pilotes de acero:

Los pilotes de acero por lo general son a base de tubos o de perfiles H de acero laminado. Los pilotes de tubo se hincan en el terreno con sus extremos abiertos o cerrados. Las vigas de patín ancho y de perfil I también se pueden utilizar como pilotes. Sin embargo, los pilotes de perfil H suelen preferirse debido a que sus espesores del alma y del patín son iguales. En muchos casos, los pilotes de tubo se rellenan con concreto después de su hincado.

Los pilotes de acero pueden estar expuestos a la corrosión. Por ejemplo, los suelos pantanosos, las turbas y otros suelos orgánicos son corrosivos. Los suelos que tienen un pH mayor que 7 no son tan corrosivos. Para compensar el efecto de la corrosión, por lo general se recomienda considerar un espesor adicional de acero (sobre el área de la sección transversal real de diseño). En muchas circunstancias los recubrimientos epóxicos, aplicados en la fábrica, sobre los pilotes funcionan satisfactoriamente contra la corrosión. Estos recubrimientos no se dañan con facilidad por el hincado del pilote. El encapsulado con concreto de los pilotes de acero en la mayoría de las zonas corrosivas también los protege contra la corrosión. Los siguientes son algunos datos generales de los pilotes de acero:

- Longitud usual: 15 a 60 m
- Carga usual: 300 a 1200 kN

Ventajas:

- Fácil manejo con respecto al corte y a la extensión a la longitud deseada.
- Pueden soportar esfuerzos de hincado altos.
- Pueden penetrar estratos duros como grava densa y roca suave.
- Alta capacidad de soporte de carga.

Desventajas

- Relativamente costosos.
- Alto nivel de ruido durante su hincado.
- Expuestos a la corrosión.
- Los pilotes H se pueden dañar o flexionar de la vertical durante su hincado a través de estratos duros o al pasar por obstrucciones mayores.

b) Pilotes de concreto:

Los pilotes de concreto se pueden dividir en dos categorías básicas: a) precolados y b) colados in situ. Los pilotes precolados se pueden preparar empleando un refuerzo ordinario y pueden tener una sección transversal cuadrada u octagonal. (Consulte la figura 11.3). El refuerzo se proporciona con el fin de habilitar al pilote para resistir el momento flexionante desarrollado durante su levantamiento y transporte, la carga vertical y el momento flexionante causado por una carga lateral. Los pilotes se cuegan a la longitud deseada y se curan antes de transportarlos a los emplazamientos de trabajo. Los siguientes son algunos datos generales de los pilotes de concreto:

- Longitud usual: 10 a 15 m
- Carga usual: 300 a 3 000 kN

Los pilotes precolados también se pueden presforzar mediante cables de presfuerzo de acero de alta resistencia. La resistencia última de estos cables es de casi 1800 MN/m². Durante el colado de los pilotes, primero los cables se pretensan entre 900 a 1300 MN/m² y luego se vierte el concreto alrededor de ellos. Después del curado, los cables se recortan produciéndose así una fuerza de compresión en la sección del pilote. Algunos datos generales de los pilotes de concreto presforzado son:

- Longitud usual: 10 a 45 m
- Carga máxima: 7 500 a 8 500 kN

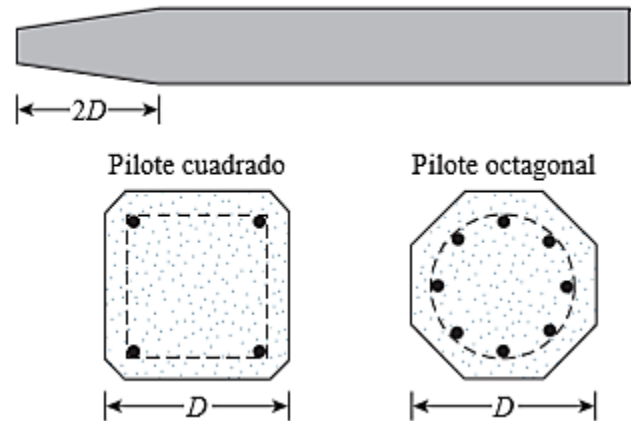


Figura 2.3 Pilotes precolados con refuerzo ordinario (Fuente: Das, 2012, pág. 541).

Los pilotes colados in situ o colados en el lugar se construyen haciendo un barreno en el terreno y luego colándolo con concreto. En la actualidad en la construcción se utilizan varios tipos de pilotes de concreto colados en el lugar y la mayoría de ellos fueron patentados por sus fabricantes. Estos pilotes se pueden dividir en dos categorías generales: a) ademados b) no ademados. Los dos tipos pueden tener un pedestal en el fondo.

c) Pilotes de madera:

Los pilotes de madera son troncos de árboles a los que se les recortaron cuidadosamente las ramas y la corteza. La longitud máxima de la mayoría de los pilotes de madera es de 10 a 20 m. Para calificar para su uso como pilote, la madera debe ser recta, resistente y sin defectos. El Manual of Practice, Núm. 17 (1959) de la American Society of Civil Engineers, dividió los pilotes de madera en tres clases:

- Pilotes clase A que soportan cargas pesadas. El diámetro mínimo del fuste debe ser de 356 mm.
- Pilotes clase B que se utilizan para soportar cargas medias. El diámetro mínimo del fuste debe ser de 305 a 330 mm.
- Pilotes clase C que se utilizan en trabajos provisionales de construcción. Se pueden emplear permanentemente para

estructuras cuando todo el pilote se encuentra debajo del nivel freático. El diámetro mínimo del fuste debe ser de 305 mm.

En cualquier caso, la punta de un pilote no debe tener un diámetro menor que 150 mm. Los pilotes de madera no pueden soportar esfuerzos altos de hincado; por lo tanto, la capacidad del pilote por lo general está limitada. Se pueden utilizar zapatas de acero para evitar dañar la punta del pilote (fondo). Las partes superiores de los pilotes de madera también se pueden dañar durante la operación de hincado. Al aplastamiento de las fibras de madera ocasionado por el impacto del martinete se le refiere como astillado. Para evitar dañar la parte superior de un pilote, se puede utilizar una banda o un capuchón metálico.

d) Pilotes compuestos:

Las partes superior e inferior de los pilotes compuestos están hechas de materiales diferentes. Por ejemplo, los pilotes compuestos se pueden hacer de acero y concreto o de madera y concreto. Los pilotes de acero y concreto consisten de una parte inferior de acero y una parte superior de concreto colado en el lugar. Este tipo de pilote se utiliza cuando la longitud del pilote requerida para un soporte adecuado excede la capacidad de un pilote simple de concreto colado en el lugar.

Los pilotes de madera y concreto suelen consistir de una parte inferior del pilote de madera debajo del nivel freático permanente y una parte superior de concreto. En cualquier caso, la formación de juntas apropiadas entre dos materiales disimilares es difícil, y por esa razón, los pilotes compuestos no se utilizan ampliamente.

2.1.7. Clasificación de los pilotes según su funcionamiento

La selección del tipo de pilote que se utilizará es una tarea muy difícil que requieren buen juicio. Además de la clasificación antes dada, Das (2012) plantea que los pilotes se pueden dividir en tres categorías principales:

a) Pilotes de carga de punta:

Si los registros de perforación del suelo establecen la presencia de lecho de roca o de un material rocoso en un emplazamiento dentro de una profundidad razonable, los pilotes se pueden prolongar hasta la superficie de la roca. (Consulte la figura 2.4 a). En este caso, la capacidad última de los pilotes depende completamente de la capacidad de soporte de carga del material subyacente; entonces son denominados pilotes de carga de punta. En la mayoría de estos casos, la longitud necesaria del pilote se puede establecer muy fácil.

b) Pilotes de fricción:

Cuando no se encuentra un estrato de roca o de un material rocoso a una profundidad razonable en un emplazamiento, los pilotes de carga de punta resultan muy largos y antieconómicos. En este tipo de subsuelo, los pilotes se hincan a través del material más suave hasta las profundidades especificadas. (Consulte la figura 2.4 c)

Estos pilotes se denominan pilotes de fricción, debido a que la mayoría de su resistencia se deriva de la fricción superficial. Sin embargo, el término pilote de fricción, aunque se utiliza con frecuencia en la bibliografía técnica, es un término inapropiado: en suelos arcillosos, la resistencia a la carga aplicada también se ocasiona por adhesión.

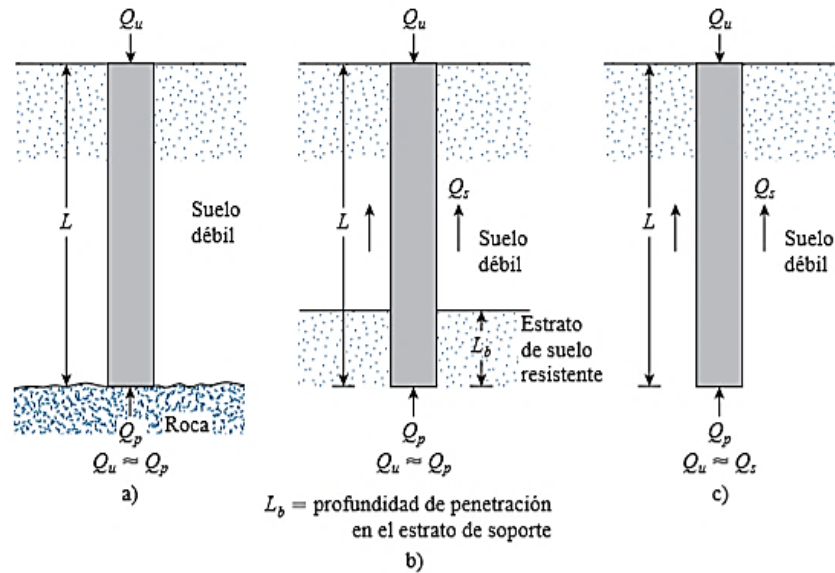


Figura 2.4 a) y b) Pilotes de carga de punta; c) pilotes de fricción. (Fuente: Das, 2012, pág. 547).

c) Pilotes de compactación:

En ciertas circunstancias, los pilotes se hincan en suelos granulares para lograr una compactación adecuada del suelo cerca de la superficie del terreno. Estos pilotes se denominan pilotes de compactación. La longitud de los pilotes de compactación depende de factores como a) la densidad relativa del suelo antes de la compactación, b) la densidad relativa deseada del suelo después de la compactación y c) la profundidad de compactación requerida; estos pilotes por lo general son corto.

2.1.8. Funciones y usos de los pilotes.

Los pilotes son un elemento constructivo con diversos usos y que de igual manera cumplen muchas funciones en una estructura, según Hurtado (2007), se consideran los siguientes:

- Transferir cargas de la superestructura y del resto de la infraestructura a través de estratos débiles o compresibles, a través del agua o aire, hasta estratos inferiores con la suficiente capacidad de carga como para soportar

la estructura, comportándose el pilote como una extensión de columna o pilar. Estos estratos inferiores pueden ser rocas, arcillas duras o suelos de baja compresibilidad.

- Transferir o repartir la carga sobre un suelo relativamente suelto a través de la fricción de superficie entre el pilote y el suelo.
- En situaciones donde el suelo alrededor de un pilote lo mueve hacia abajo, a esto se le denomina "fricción negativa", esta fricción tiende a hundir el pilote y si éste no puede penetrar más, en la punta del pilote se generará una presión concentrada. Este caso se puede presentar cuando se hinca un pilote en un estrato blando en cuya superficie se coloca un relleno que consolide el terreno, entonces éste al consolidarse generará en las caras del pilote unas fuerzas de fricción hacia abajo que se denominan fricción negativa.
- Proporcionar anclaje a estructuras sujetas a subpresiones, momentos de volteo o cualquier efecto que trate de levantar la estructura. Las fuerzas horizontales se resisten por pilotes en flexión o por grupos de pilotes verticales e inclinados que actúan como un sistema estructural, combinando las resistencias axiales y laterales de todo el grupo.
- Alcanzar con la cimentación profundidades que no estén sujetas a erosión, socavaciones u otros efectos.
- Para evitar los daños que puede producir una futura excavación a la cimentación de una edificación adyacente; en este caso el pilote lleva la carga de la cimentación debajo del nivel de excavación esperado.
- En áreas de suelos expansivos o colapsables, para asegurar que los movimientos estacionales no sucederán.
- Proteger estructuras marinas como muelles, atracaderos, contra impactos de barcos u objetos flotantes.
- Soportar muros de contención, contrafuertes o cimentaciones de máquinas.
- Compactar el suelo

2.1.9. Cabezales de pilotes

El elemento estructural que se encarga de conectar las cabezas de los pilotes con la superestructura son los llamados cabezales. Éstos suelen ser elementos de concreto armado de gran volumen y por ende de mucha rigidez, los cuales se vacían monolíticamente (Quintana & Rojas, 2013).

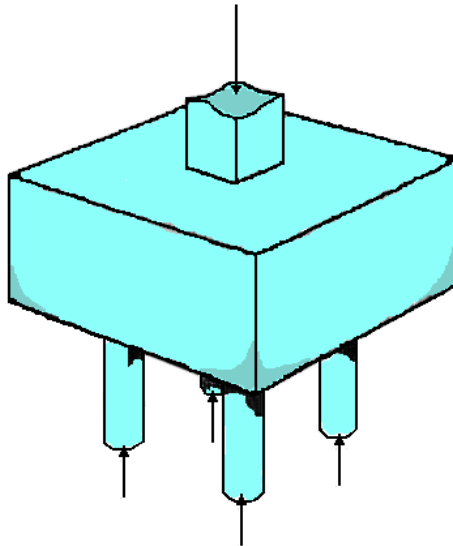


Figura 2.5. Cabezal apoyado sobre cuatro pilotes (Fuente Propia).

Los cabezales de pilotes son en muchos aspectos similares a las zapatas sobre suelo, excepto por dos características:

- Las reacciones en el cabezal actúan como cargas concentradas sobre los pilotes individuales, en vez de hacerlo como presiones distribuidas.
- Si el total de todas las reacciones de los pilotes de un grupo se divide por el área de la zapata para obtener una presión uniforme equivalente, se encuentra que esta presión equivalente es sustancialmente mayor en los cabezales de los pilotes que en las zapatas superficiales. Esto significa que los momentos, y en particular los cortantes, también son mayores en forma recíproca, lo cual exige mayores alturas de zapata que para aquellas superficiales con dimensiones horizontales similares.

Con el fin de distribuir las cargas a todos los pilotes de manera uniforme, es aconsejable en todo caso suministrar una rigidez considerable, es decir, una buena altura al cabezal de los pilotes (Nilson, 1999).

2.1.10. Hipótesis fundamentales para el análisis de los cabezales

Para el análisis de cabezales de pilotes, Fratelli (1993) considera válidas las siguientes hipótesis:

- Los cabezales son miembros estructurales doblemente simétricos en planta, y conectan pilotes también simétricamente distribuidos.
- Todos los pilotes de un mismo cabezal son iguales y tienen idéntica capacidad resistente.
- Los pilotes de cada cabezal se suponen apoyados sobre los mismos estratos del subsuelo.
- El número necesario de pilotes, en cada cabezal, y su distribución, se determina en función de la combinación más desfavorable de las cargas que actúan sobre el cabezal.
- La distribución de las presiones en el suelo debidas a las cargas que les transmite un grupo de pilotes, debe ser consistente con la capacidad portante del suelo, y respetar los principios establecidos de la mecánica de suelos.
- La carga máxima que debe soportar cada pilote para la combinación más desfavorable de las cargas transmitida por la superestructura, no debe superar la resistencia del pilote como elemento estructural.
- Debido a su gran volumen, los cabezales son elementos rígidos que pueden sufrir asentamiento y rotaciones en el suelo de fundación.
- Las cargas y momentos flectores que las columnas transmiten al cabezal solicitan a los pilotes en forma de cargas axiales aplicadas en el baricentro de su sección transversal. Estas cargas incluyen a sí mismas el peso del cabezal.

2.2. Principios del método Puntal-Tensor

2.2.1. Principio de Saint Venant

El investigador francés Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant en 1855 publicó la teoría elástica de los sólidos, en la cual expone que la diferencia entre los efectos de dos sistemas de cargas estáticamente equivalentes se hace arbitrariamente pequeña a distancias suficientemente grandes de los puntos de aplicación de dichas cargas (Hough Love, 1892). Ver Figura 2.6

De acuerdo con Popov (1999), este principio simplemente enuncia la importancia de la forma de aplicación de las fuerzas en las áreas donde actúan, así como la perturbación causada por el cambio de sección transversal.

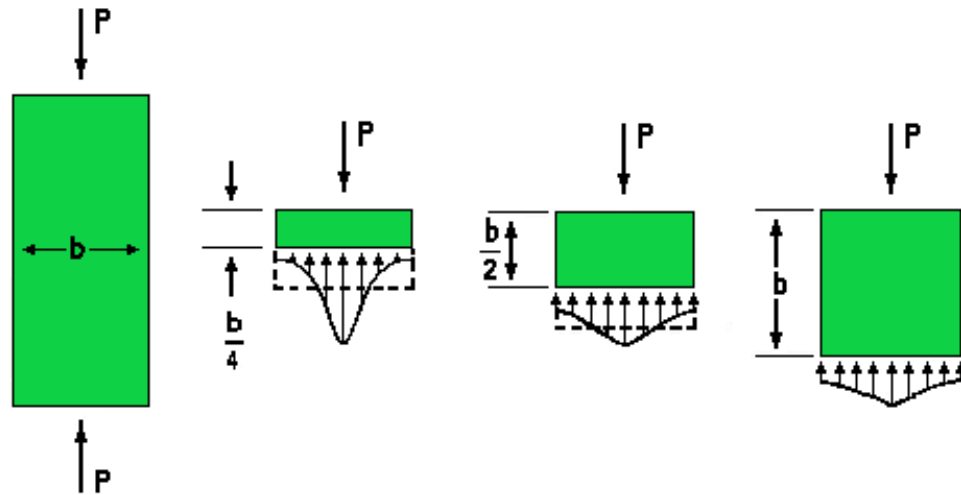


Figura 2.6. Distribución de esfuerzos según la teoría de Saint-Venant (Fuente propia).

2.2.2. Regiones continuas (Región B)

Las regiones en las que el flujo de esfuerzos de compresión es uniforme, se denominan regiones B (Bernoulli) o regiones continuas a cada porción de un elemento estructural en donde su sección transversal se comporta de tal manera que cumple con la teoría de Navier-Bernoulli (Alcocer & Uribe, 2000). Ver Figura 2.7.

2.2.3. Regiones discontinuas (Región D)

Según Reyes (2014), se denominan regiones D (Discontinuity) o regiones discontinuas a todas aquellas regiones en donde se cumple el principio de Saint Venant, las cuales su comportamiento no cumple con la hipótesis de Navier-Bernoulli, ya que no es posible aceptar que las secciones permanecerán planas. Estas regiones se relacionan con la existencia de fuerzas concentradas (cargas o apoyos) o con variaciones bruscas en la geometría de la estructura.

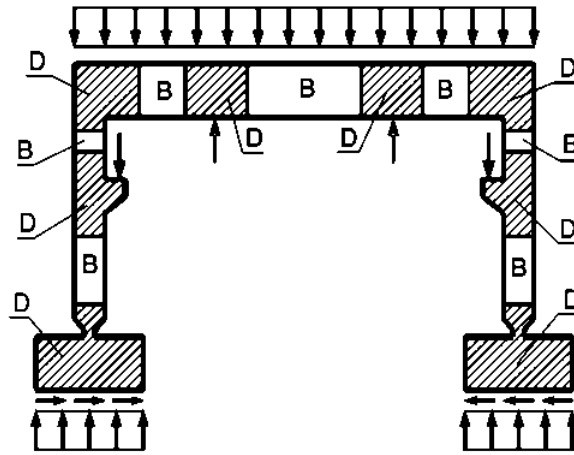


Figura 2.7 Localización de regiones B y D dentro de una estructura

(Fuente: Pascual, 2011, pág. 7).

2.2.3.1. Discontinuidad geométrica

De acuerdo a Martín (2003) este tipo de discontinuidad se refiere a todos aquellos casos donde la geometría de las secciones se aleja de ser prismáticas en toda su longitud, mostrando cambios a lo largo de su sección de manera lineal, seccionada y parabólica; así como, huecos internos, como se señala en las Figuras 2.8, en donde se muestra claramente que aplicar la distribución de tensiones y deformaciones basadas en la hipótesis de Navier-Bernoulli llevaría a resultados erróneos.

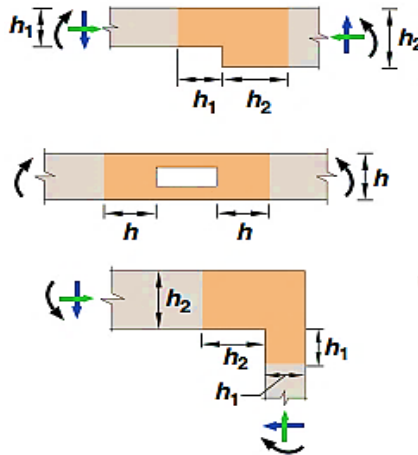


Figura 2.8. Regiones con discontinuidad geométrica seccionada

(Fuente: ACI, 2019, pág. 436).

2.2.3.2. *Discontinuidad estática*

También son llamadas discontinuidades mecánicas, son resultado de la aplicación de una carga puntual o concentrada. El flujo de tensiones provocado por la carga no responde en una determinada zona con lo planteado en la hipótesis de Navier-Bernoulli, sino que suele ser un flujo con distribución tensional y deformaciones muy complejas (Martín, 2003).

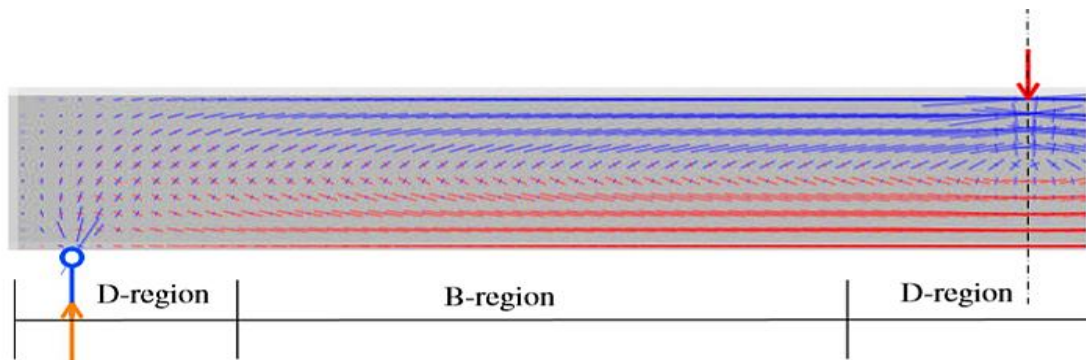


Figura 2.9. Discontinuidad estática por cargas puntuales (Fuente: Chantelot & Mathern, 2010, pág. 9).

2.2.3.3. Discontinuidad generalizada

A diferencia de los tipos expuestos anteriormente, que correspondían a zonas determinadas de una estructura, hay casos en los cuales las regiones, según sus parámetros de alcances, no son locales sino globales, es decir, toda la estructura se comporta como una región discontinua (Martín, 2003).

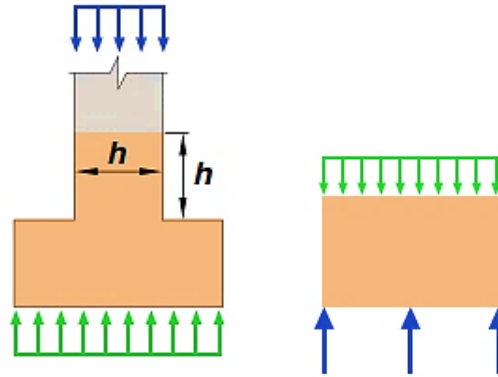


Figura 2.10. Casos de discontinuidad generalizada (Fuente: ACI, 2019, pág. 436).

2.3. Método Puntal-Tensor

2.3.1. Definición general

El modelo puntal-tensor (STM) consiste en la idealización de los campos de esfuerzos internos mediante un reticulado hipotético, en el cual los campos localizados en las áreas de compresión son denominados puntales y los esfuerzos de tracción son representados por tensores, cada intersección entre ambos tipos de elementos se denominan nodos.

Una vez conociendo las fuerzas actuantes en las fronteras de la región D, y por ende del modelo, podemos determinar la fuerza de cada miembro del modelo usando la teoría estática básica (Barney & David, 2007).

2.3.2. Geometría de la retícula

2.3.2.1. Consideraciones básicas

En la sección 23.2 del código ACI (2019) presenta algunos requisitos principales que deben satisfacerse por un modelo puntal-tensor:

- a) “Para determinar la geometría de la cercha idealizada, se deben considerar las dimensiones de los puntales, tensores, zonas nodales, áreas de reacciones y apoyos” (ACI, 2019, pág. 439). Ver Figura 2.11

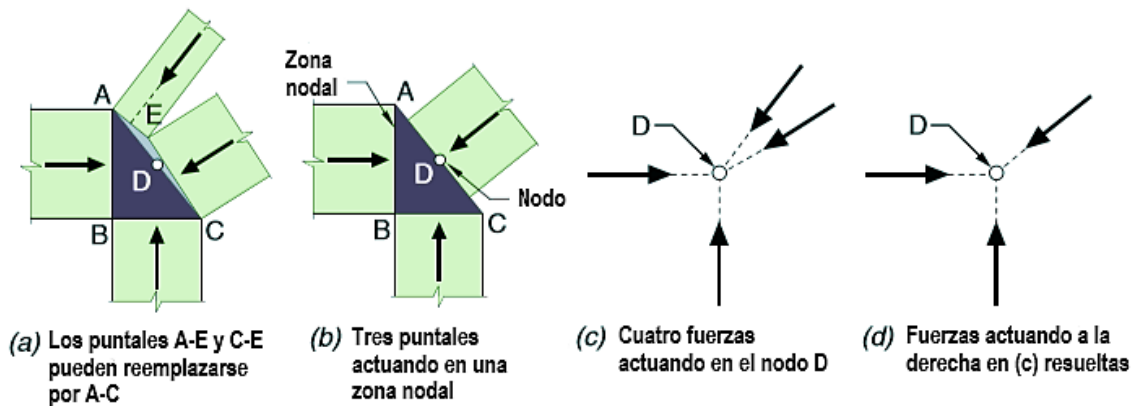


Figura 2.11. Resolución de las fuerzas en una zona nodal (Fuente: ACI, 2019, pág. 439).

En las fases tempranas del diseño de una región D puede ser suficiente considerar sólo los ejes de los puntales y tensores al disponer un modelo del puntal-tensor. Sin embargo, es necesario considerar las anchuras de los puntales, tensores, zonas nodales y regiones de apoyo para el modelo del puntal-tensor.

- b) “Los modelos puntal-tensor deben ser capaces de transferir todas las cargas mayoradas a los apoyos o regiones B adyacentes”, de acuerdo con (ACI, 2019, pág. 439)..
- c) “Las fuerzas internas en el modelo puntal tensor deben estar en equilibrio con las cargas aplicadas y las reacciones” según (ACI, 2019, pág. 439). El cálculo de las reacciones y fuerzas del puntal-tensor debe satisfacer la estática.
- d) “Se permite que los tensores atraviesen los puntales y otros tensores” esto conforme con (ACI, 2019, pág. 439).

- e) “Los puntales deben cruzarse o superponerse sólo en los nodos”, esto establecido por (ACI, 2019, pág. 439).
- f) “El ángulo entre los ejes de cualquier puntal y de cualquier tensor entrando al mismo nodo no debe ser menor de 25 grados” como se afirma en (ACI, 2019, pág. 442).

El ángulo entre los ejes de los puntales y tensores que actúan en un nudo debe ser lo suficientemente grande para mitigar el agrietamiento y evitar las incompatibilidades debidas al acortamiento de los puntales y alargamiento de los tensores que se producen casi en las mismas direcciones.

Un diseño estructural que es estáticamente admisible y seguro, satisface los requisitos del teorema del límite inferior en la teoría de plasticidad. Esto implica que la carga de falla calculada por un modelo del puntal-tensor menosprecia la carga de falla real. Para ser verdad, la estructura debe tener bastante ductilidad para acomodar cualquier necesidad de redistribución de fuerzas.

2.3.2.2. Principales criterios para la elección del modelo más adecuado

Según establece Reyes (2014), las estructuras tienden a resistir con el menor trabajo de deformación posible, entre varios modelos posibles se debe elegir el que produzca el menor trabajo interno de deformación.

Los puntales de hormigón son muy rígidos aportan poco al trabajo interno, por lo que si los esfuerzos entre los diferentes tensores fueran del mismo orden el modelo más adecuado será el que presente menor longitud total de tensores. En caso contrario será el que presente menor valor de la sumatoria aplicada a todos los tensores del producto de la fuerza en cada tensor por su longitud.

Esto se basa en el principio de energía de deformación mínima:

$$\sum_{i=1}^n f_i l_i = \text{mínimo} \quad (\text{Ec. 2-01})$$

Donde:

f_i : Fuerza en el tensor

l_i : Longitud del tensor

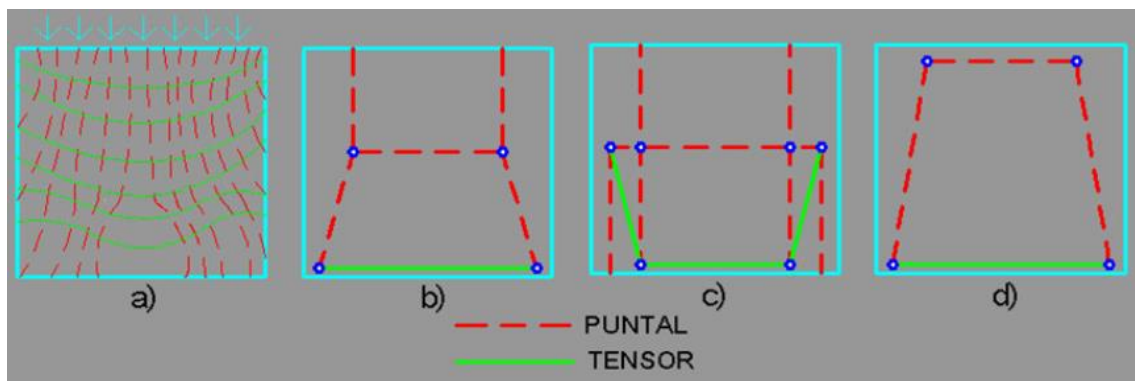


Figura 2.12. Algunas opciones del modelo puntal tensor (Fuente propia).

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo más adecuado resultará ser el modelo d) de la Figura 2.12, aunque si la pieza estuviera fuertemente solicitada conviene adoptar el modelo b). En ambas situaciones el modelo c) es el más ineficiente e inadecuado. En otras palabras, el modelo no es único y podrá variar con el nivel de sollicitación y de un proyectista a otro.

La única forma de llegar a un modelo único sería satisfaciendo enteramente las condiciones de compatibilidad para lo cual habría que introducir las ecuaciones constitutivas de los materiales y resolver enteramente un problema que no es lineal perdiéndose de esta manera la simplicidad del método.

2.3.2.3. Método para encontrar el modelo Puntal-Tensor

De acuerdo con Aedo (2004) una de las maneras óptimas y fáciles de aprender a desarrollar modelo puntal-tensor es usar el llamado "camino de cargas". Este

consiste en seguir los caminos que recorren los esfuerzos internos, pero analizándolos con las condiciones que se encuentren al tratar las regiones D, que son las que nos interesa estudiar. Este método nos da una idea clara de cómo poder dimensionar los puntales y tensores y la ubicación más adecuada que se pueda tener de ellos.

El esquema de análisis consiste primero en asegurar que se satisfaga el equilibrio externo de una región D, determinando todas las cargas y reacciones de apoyo actuando en la zona. Las cargas externas de diseño que se utilizan en una región D se obtienen derivándolas desde los límites adyacentes a las regiones B, asumiendo que existe una de la distribución lineal de esfuerzos (Aedo, 2004).

Aedo (2004) indica que el diagrama de tensiones de la región D se subdivide de manera tal que las cargas que se tienen en un lado de la estructura encuentran su contraparte en el otro lado, teniendo en consideración que los caminos de cargas que conectan los lados opuestos no se cruzarán unos con otros.

El camino de carga empieza y termina en el centro de gravedad de los diagramas de esfuerzo correspondientes a los límites de la región, y obtienen también de esos puntos la dirección de las cargas aplicadas o reacciones, tal como lo representa la figura 2.13. Estas cargas tienden a tomar el camino más corto posible entre ellas y dejan que las curvaturas se concentren cerca de las grandes agrupaciones de esfuerzos como reacciones de apoyo o cargas puntuales.

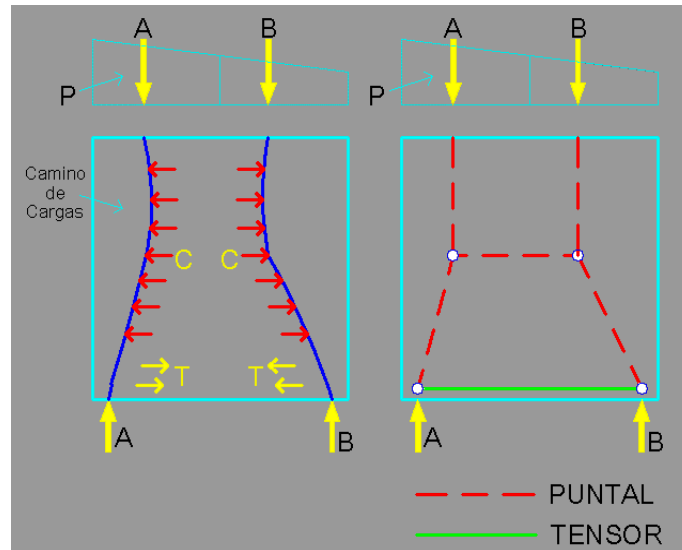


Figura 2.13. Caminos de carga y modelo puntal-tensor (Fuente propia).

Cabe mencionar que en algunos casos el diagrama de tensiones no es interpretado completamente de acuerdo con los caminos de carga descritos. En estas situaciones las resultantes de las cargas transitan en un flujo interno, y permanecen iguales en magnitud, pero con signo opuesto al que entran en la estructura, realizando una vuelta en U hacia el mismo lado por el cual ingresaron y efectuando un giro rápido al llegar generalmente cerca del borde opuesto a la zona como lo ilustrado por las fuerzas B en la figura 2.14.

Con esto podemos ver que el flujo interno de fuerzas sigue trayectorias tendientes a trasladar las cargas aplicadas, pero a su vez también vela por mantener el equilibrio interno en la estructura generando caminos paralelos que tienen como fin asegurar el buen funcionamiento global de toda la estructura (Aedo, 2004).

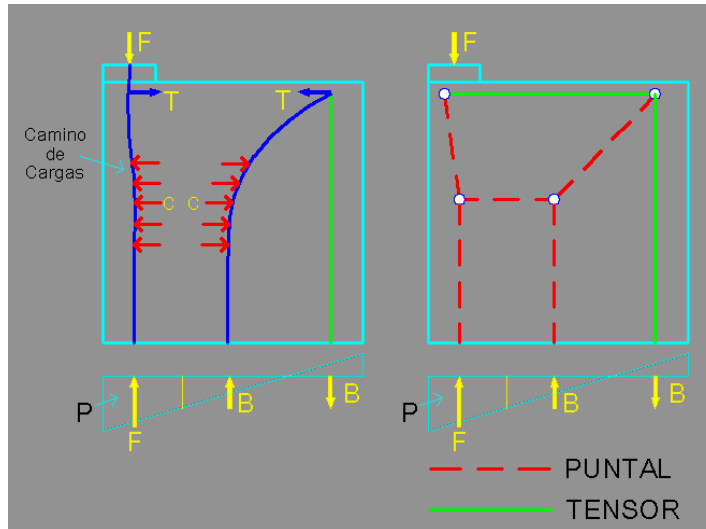


Figura 2.14. Caminos de carga incluyendo una “vuelta en U” y modelo puntal-tensor (Fuente propia).

Después de representar todos los caminos de cargas con curvas lisas y reemplazarlos por polígonos debe agregarse el sistema de puntales y tensores para asegurar el equilibrio transversal que actúa entre los puntos de unión o nodos, lo que complementa el equilibrio en la dirección de las cargas aplicadas, incluyendo en esto al giro en U.

Los diseños resultantes son a menudo bastante particulares, lo que implica que el equilibrio en un modelo dado sólo es posible para casos de carga específicos. Por consiguiente, la geometría del modelo más apropiado tiene que adaptarse al caso de carga estudiado y la mayoría de las veces está determinada por las condiciones de equilibrio obtenidas después que unos pocos puntales o tensores han sido escogidos (Aedo, 2004).

En la figura 2.15 los puntales y tensores verticales son encontrados por el método de camino de carga, la estructura se divide en una región B y otra región D.

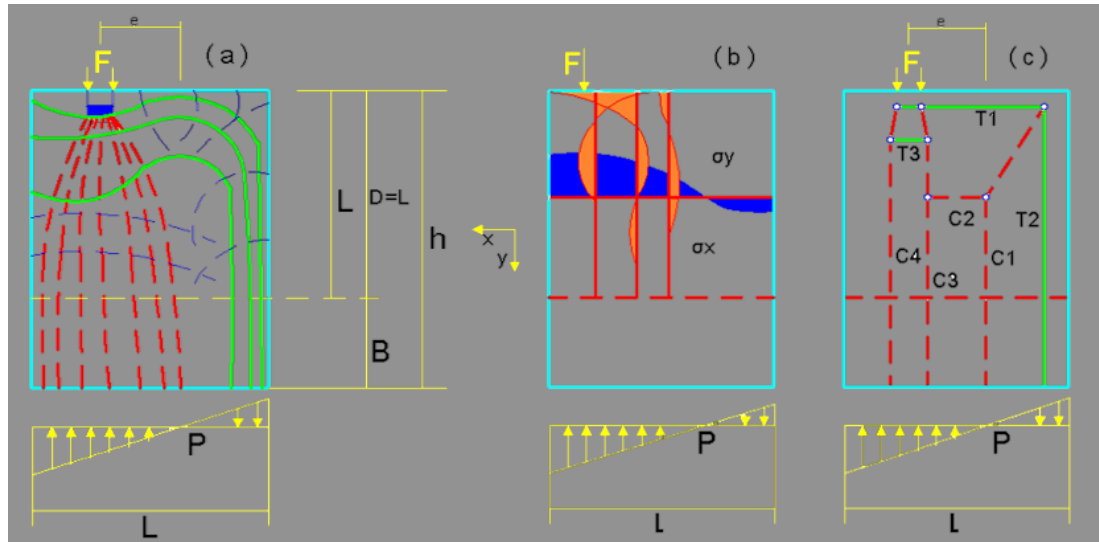


Fig. 2.15. Estructura con sus trayectorias de esfuerzo elásticas, diagramas de esfuerzos elásticos y el modelo puntal–tensor creado (Fuente propia).

2.3.3. Puntales

Los puntales son los elementos resistentes del modelo sometidos a compresión, generalmente debido a las características resistentes de los materiales, lo más adecuado es materializarlos sólo en hormigón. No obstante, hay puntales que además del hormigón pueden contar con armaduras comprimidas, para aumentar su resistencia (ACHE, 2003).

A continuación, se describen las distintas tipologías de puntales, desde el punto de vista geométrico.

2.3.3.1. Puntal prismático

De acuerdo con (Alcocer & Uribe, 2000, pág. 29), un puntal prismático “es la idealización más simple del campo de esfuerzo de compresión y es generalmente usado para modelar campos de esfuerzos con trayectorias uniformes y paralelas” Ver Figura 2.16 (A).

2.3.3.2. Puntal en forma de abanico

El puntal en forma de abanico según (Alcocer & Uribe, 2000, pág. 29). “se presenta en puntos de aplicación de cargas o en apoyos y está formado por varios

puntales con forma trapezoidal que permiten transmitir la carga desde el nudo hasta los estribos”. Ver Figura 2.16 (C).

2.3.3.3. *Puntal en forma de botella*

Son “puntales inclinados que producen esfuerzos de tensión perpendicular a la línea de acción de las cargas aplicadas, los cuales pueden ser resistidos por refuerzo transversal o por tensión del concreto”, esto lo afirma (Alcocer & Uribe, 2000, pág. 29). Ver Figura 2.16 (B).

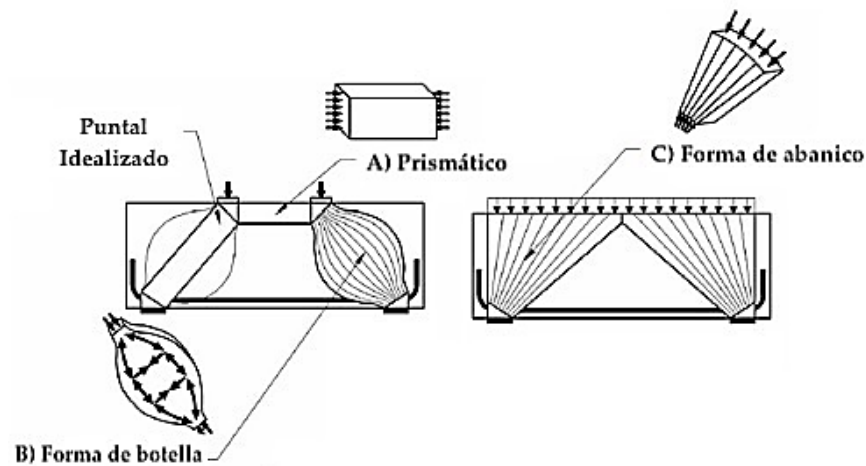


Figura 2.16. Tipos de puntales a compresión (Fuente: Gutiérrez Aldana, Sevilla Rugama, & Moreno Guevara, 2019, pág. 26)

Según el código ACI (2019), la elección del tipo de puntal a usarse en el modelo de análisis depende de algunos factores, como el área de contacto entre el extremo del puntal y la zona nodal, de igual manera, se considera la resistencia efectiva de la zona nodal y por último el ancho respectivo de los apoyos.

2.3.3.4. *Resistencia de los puntales*

Como bien se conoce, el objetivo del diseño en concreto estructural, es garantizar un comportamiento dúctil, lo cual significa asegurarse que la falla se producirá primero por fluencia del acero que, por aplastamiento del concreto, este mismo criterio se aplica al modelo puntal tensor, con el fin de evitar el aplastamiento prematuro de los puntales (Alcocer & Uribe, 2000).

Para obtener la resistencia máxima de un puntal, se emplea la resistencia efectiva del puntal, que a su vez se calcula usando factores de reducción de resistencia.

$$F_u \leq \phi F_n \quad (\text{Ec. 2-02})$$

(Ec- 23.3.1, ACI 318-19)

Donde:

F_u : Fuerza en el puntal que actúa en el nodo debido a las cargas factorizadas

F_n : Resistencia nominal del elemento

La resistencia a la compresión nominal de un puntal f_{ns} está dada por:

a) Puntal sin refuerzo longitudinal:

$$f_{ns} = \phi f_{ce} A_{cs} \quad (\text{Ec. 2-03})$$

(Ec- 23.4.1a, ACI 318-19)

b) Puntal con refuerzo longitudinal:

$$f_{ns} = \phi f_{ce} A_{cs} + A'_s f'_s \quad (\text{Ec. 2-04})$$

(Ec- 23.4.1b, ACI 318-19)

$$f_{ce} = \phi 0.85 \beta_c \beta_s f'_c \quad (\text{Ec. 2-05})$$

(Ec- 23.4.3, ACI 318-19)

Donde:

f_{ns} : Resistencia nominal de un puntal

f_{ce} : Resistencia efectiva del concreto en el puntal

A_{cs} : Área de la sección transversal al final del puntal que se está considerando

A'_s : Área del refuerzo de compresión a lo largo de la longitud del puntal

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto en los puntales

f'_s : Tensión en el refuerzo de compresión a la fuerza axial nominal del puntal

ϕ : Factor de reducción de resistencia

Tabla 2.1

Coeeficientes de puntal β_s (Fuente: ACI, 2019, pág. 444).

Ubicación del puntal	Tipo de puntal	Criterios	β_s	
Miembros de tensión o zonas de tensión de miembros	Ninguno	Todos los casos	0.4	(a)
	Puntales perimetrales	Todos los casos	1.0	(b)
Todos los otros casos		Reforzamiento satisfaciendo (a) o (b) de Tabla 23.5.1	0.75	(c)
	Puntales interiores	Ubicado en regiones satisfaciendo 23.4.4	0.75	(d)
		Articulaciones columna-viga	0.75	(e)
		Todos los otros casos	0.4	(f)

Tabla 2.2

Factor de modificación del confinamiento de los puntales y nodos β_c

(Fuente: ACI, 2019, pág. 444).

Ubicación	Tipo de puntal	β_c	
El final de un puntal conectado a un nodo que incluye una superficie de apoyo	El menor de (a) y (b)	$\sqrt{A_2/A_1}$, cuando A_1 está definido por la superficie de apoyo	(a)
Nodo que incluye una superficie de apoyo		2.0	(b)
Otros casos		1.0	(c)

Según (ACI, 2019, pág. 444), si el uso de β_c es 0.75, basado en la línea (d) de la tabla 2,1 las dimensiones de los miembros serán seleccionadas para satisfacer la **Ec. 2-07**, cuando λ_s está definido por:

- a) Si el refuerzo distribuido se proporciona de acuerdo con 23.5, se tomará como $\lambda_s = 1.0$.

- b) Si el refuerzo distribuido no se proporciona de acuerdo con 23.5, se tomará el valor con la siguiente ecuación:

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{d}{10}}} \leq 1 \quad \begin{matrix} \text{(Ec. 2-06)} \\ \text{(Ec- 23.4.4.1, ACI 318-19)} \end{matrix}$$

$$V_u \leq \phi 5 \tan \phi \lambda \lambda_s \sqrt{f'_c} b_w d \quad \begin{matrix} \text{(Ec. 2-07)} \\ \text{(Ec- 23.4.4, ACI 318-19)} \end{matrix}$$

Donde:

V_u : Fuerza cortante última

λ : Factor de corrección para concreto de peso ligero

λ_s : Factor de modificación del efecto de tamaño

ϕ : Factor de reducción de resistencia

b_w : Ancho del alma

d : Peralte efectivo de la sección transversal

2.3.3.5. Refuerzo de los puntales

Refuerzo mínimo distribuido

En las regiones D diseñadas usando el método puntal-tensor, el refuerzo mínimo distribuido será el que se proporciona a través de los ejes en los puntales interiores, de acuerdo con (ACI, 2019), en el cual se detalla la siguiente tabla:

Tabla 2.3

Refuerzo mínimo distribuido (Fuente: ACI, 2019, pág. 445)

<i>Restricción lateral del puntal</i>	<i>Configuración del refuerzo</i>	<i>Relación mínima del refuerzo distribuido</i>	
	Cuadrícula ortogonal	0.0025 en cada dirección	(a)
No restringido	Refuerzo en una dirección cruzando el puntal en ángulo α_1	$\frac{0.0025}{\sin^2 \alpha_1}$	(b)
Restringido	No se requiere un refuerzo distribuido		(c)

De la tabla anterior, el refuerzo distribuido requerido deberá satisfacer los apartados:

- a) El espacio no excederá de 12 pulgadas.
- b) El ángulo α_1 no será inferior a 40 grados.

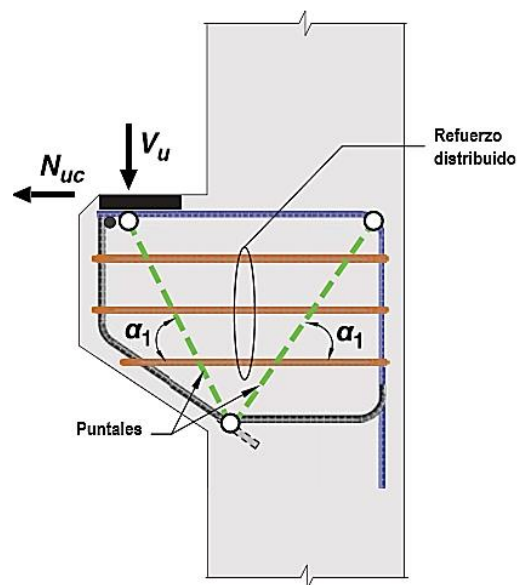


Figura 2.17. Refuerzo distribuido que cruza puntales interiores (Fuente: ACI, 2019, pág. 446).

Detalle del refuerzo del puntal

Como se afirma en ACI (2019), pág. 446, “el refuerzo de compresión en los puntales será paralelo al eje del puntal y encerrado a lo largo de la longitud del puntal por estribos cerrados de acuerdo con 23.6.3 o por espirales de acuerdo con 23.6.4”.

Como se detalla en ACI (2019), pág. 446, “el refuerzo de compresión en los puntales será anclado para desarrollar f'_s en la cara de la zona nodal, donde f'_s se calcula de acuerdo con 23.4.1”.

De igual manera el confinamiento del acero de los puntales debe ser adecuado, para ello según ACI (2019), pág. 446, se expresa que “los estribos cerrados que encierran al refuerzo a compresión en los puntales deberán satisfacer 25.7.2 del ACI (2019) y esta sección”.

Luego de asegurar el cumplimiento de las características de los estribos de confinamiento de acuerdo a ACI (2019), pág. 446, debe verificarse que “el espaciamiento de los estribos s , a lo largo del puntal, no debe exceder el menor de (a) hasta (c)”

- a) La dimensión más pequeña de la sección transversal del puntal
- b) $48d_b$ de barra o alambre usado para el refuerzo de los estribos cerrados
- c) $16d_b$ del refuerzo a compresión

Según ACI (2019), pág. 446, “el primer tensor no estará situado a más de $0,5s$ de la cara de la zona nodal en cada extremo de un puntal”.

Para lograr una mayor unión entre el acero longitudinal y transversal en la sección de un puntal, ACI (2019), pág. 446, se especifica que:

Los estribos deben disponerse de tal forma que cada barra longitudinal de esquina y barra alterna tenga apoyo lateral proporcionado por la esquina de un estribo o por ganchos suplementarios con dobleces que tengan un ángulo interior no mayor de 135 grados, y ninguna barra longitudinal debe

estar separada a más de 150 mm libres medidos a lo largo del estribo o a cada lado de la barra apoyada lateralmente.

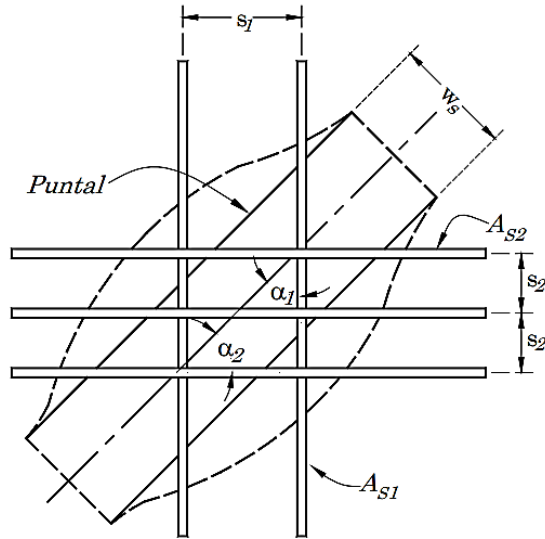


Figura 2.18. Refuerzo que atraviesa un puntal (Fuente: ACI, 2014, pág. 417).

2.3.4. Tensores

En Morales (2007), se establece que los tensores corresponden a elementos a tracción en el modelo puntal-tensor. Un tensor consiste en una armadura o acero de pretensado más una parte del hormigón que es concéntrico al eje del tensor. El hormigón adyacente se incluye para definir la zona en la que deben ser ancladas las fuerzas de los puntales y tensores. En un tensor el hormigón no se usa para resistir la fuerza axial de un tensor. Aunque no se encuentra considerado en el diseño, el hormigón adyacente reducirá las elongaciones del tensor, especialmente al ser sometida a cargas de servicio.

Por otra parte, en (Barney & David, 2007) se concluye que:

Aunque se sabe que el concreto tiene capacidad de tensión, su contribución a la resistencia de la unión se desprecia normalmente para consideraciones de resistencia, por lo tanto, solo se utilizan acero de refuerzo o tendones para satisfacer los requisitos de empalme calculados.

Ya que se atribuye el acero a la resistencia de la zona nodal, la geometría y la capacidad del tensor son más fáciles de determinar.

2.3.4.1. Resistencia de los tensores

En Reyes(2014), pág. 59 se espresa que “en un tensor el concreto no se usa para resistir la fuerza axial de un tensor. Aunque no se encuentra considerado en el diseño, el concreto adyacente reducirá las elongaciones del tensor, especialmente al ser sometida a cargas de servicio”.

Los tensores al igual que los puntales deben garantizar que su resistencia de diseño sea mayor que los esfuerzos de tensión que actúen en ellos, cumpliendo con Ec. 2-02.

En (ACI, 2019), para obtener la resistencia nominal a tracción de los tensores se presenta la siguiente expresión:

$$F_{nt} = A_{ts}f_y + A_{tp}\Delta f_p \quad \begin{matrix} \text{(Ec. 2-08)} \\ \text{(Ec- 23.7.2, ACI 318-19)} \end{matrix}$$

La resistencia total de un tensor pretensado se obtiene mediante:

$$A_{tp}(f_{se} + \Delta f_p) \quad \begin{matrix} \text{(Ec. 2-09)} \\ \text{(Ec- 23.7.2b, ACI 318-19)} \end{matrix}$$

Donde:

F_{nt} : Resistencia nominal a tracción de los tensores

A_{ts} : Área de refuerzo sin pre-esfuerzo en un tensor

A_{tp} : Área de acero pre-esforzado en un tensor, para miembros no pretensados su valor será cero.

f_{se} : Esfuerzo efectivo en el refuerzo pre-esforzado después de las pérdidas

Δf_p : Incremento en el esfuerzo para acero pre-esforzado debido a cargas factorizadas

f_y : Esfuerzo normal en el acero

Según (ACI, 2019) en la Ec. (2.08), se permitirá tomar f_p igual a 60.000 psi para el refuerzo pretensado adherido y 10.000 psi para el refuerzo pretensado no

adherido. Se permitirán valores más altos de si justifican el análisis, pero no se tomará f_p mayor que $(f_{py} - f_{se})$.

2.3.4.2. Refuerzo en los tensores

En (ACI, 2019) se indica que, el ancho efectivo w_t del tensor asumido en el diseño, puede variar entre los siguientes límites, dependiendo de la distribución del refuerzo:

- a) Si las barras d refuerzo están en una sola capa, el ancho efectivo w_t puede ser tomado como el doble del recubrimiento más el diámetro de la varilla.
- b) El ancho efectivo del tensor w_t , se puede estimar de la misma manera que el ancho efectivo correspondiente a una zona nodal hidrostática, calculada como:

$$w_{t,m\acute{a}x} = f_{nt}/(f_{ce}b_s) \quad \begin{matrix} \text{(Ec. 2-10)} \\ \text{(Ec- 23.8.1, ACI 318-19)} \end{matrix}$$

Donde:

$w_{t,m\acute{a}x}$: Ancho máximo efectivo del tensor

f_{nt} : Resistencia nominal a tracción de los tensores

f_{ce} : Resistencia efectiva de compresión

b_s : Ancho del puntal

Si el ancho del tensor excede el valor de (a), el refuerzo debe distribuirse aproximadamente de manera uniforme sobre el ancho y el grosor del tensor.

2.3.4.3. Anclaje de los tensores

La armadura del tensor debe anclarse mediante dispositivos de anclaje pos-tensados, ganchos estándar o mediante el desarrollo de barras rectas, de acuerdo con la sección 23.8.3 del código (ACI, 2019) .

Según ACI (2019), el refuerzo de un tensor debe anclarse antes de que salga de la zona nodal extendida, exactamente en el punto definido por la intersección del centroide de las barras del tensor y las extensiones de los contornos del puntal o

de la zona de apoyo. Parte del anclaje puede lograrse extendiendo el refuerzo a través de la zona nodal y desarrollándolo más allá de la zona nodal. Si el anclaje se realiza con ganchos a 90 grados, estos deben estar confinados dentro del refuerzo para evitar que se agrieten a lo largo de la parte externa de los ganchos en la región de apoyo.

La longitud de desarrollo de la armadura del tensor puede ser reducida a través de ganchos, dispositivos mecánicos, confinamiento adicional o empalmándola con diversas capas de barras más pequeñas.

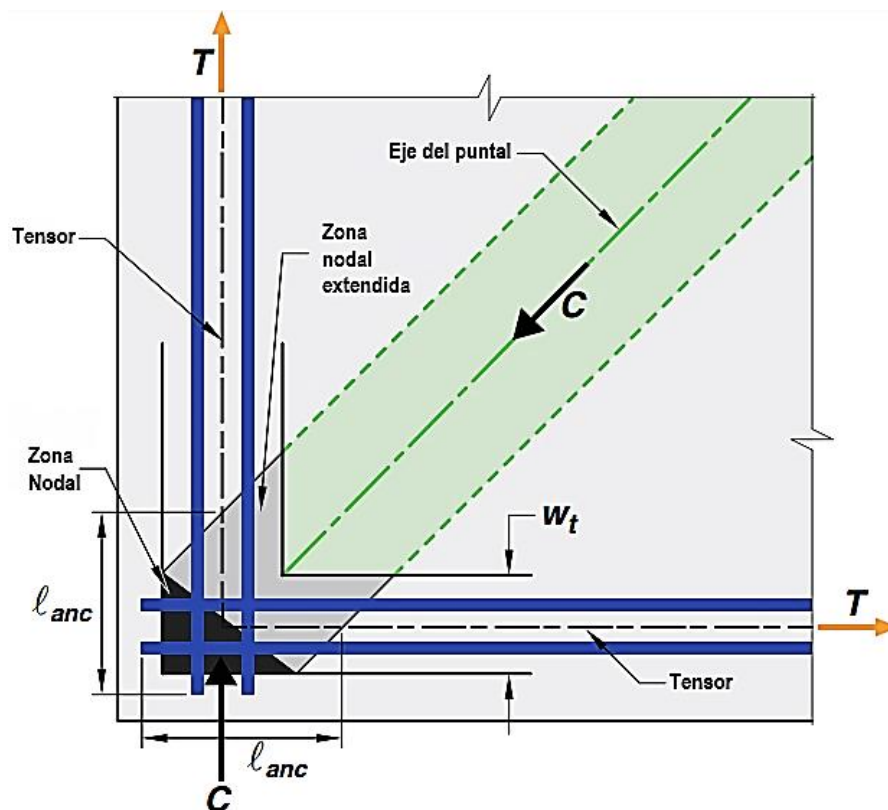


Figura 2.19. Longitud de anclaje en tensores (Fuente: ACI, 2019, pág. 448).

2.3.5. Nodos y zonas nodales

Los nodos son puntos de intersección de los ejes de los puntales y tensores que componen un modelo puntal-tensor y las zonas nodales son regiones de hormigón situadas alrededor de los nodos donde se produce la conexión física entre los miembros del modelo. En un nodo plano, para que pueda existir equilibrio es

necesario que al mismo nodo concurren al menos tres fuerzas que pueden provenir tanto de miembros del modelo como de reacciones (Morales, 2007).

Los nodos pueden clasificarse de acuerdo a la naturaleza de las fuerzas que concurren en ellos, (C representa elementos de compresión y T representa elementos de tensión). Los casos más comunes son los nodos CCC, CCT, CTT, TTT. Ver Figura 2.20.

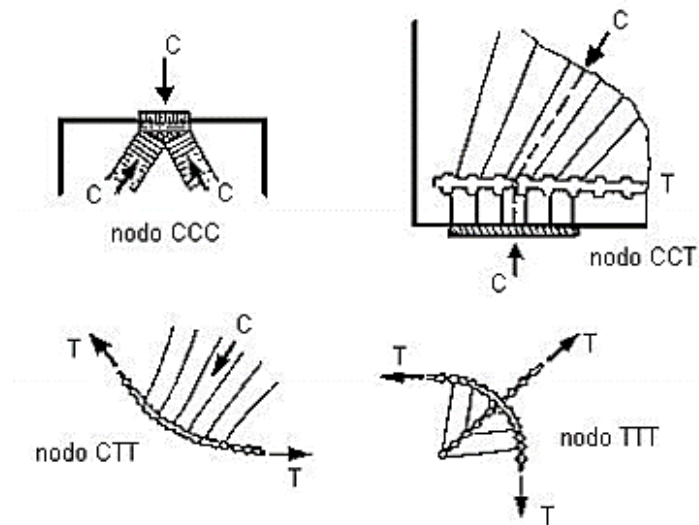


Figura 2.20. Tipos de nodos según las fuerzas concurrentes (Fuente: Aedo, 2004, pág. 76).

Para definir la geometría de la zona nodal debe considerarse el ancho de los puntales conectados al nodo y su ángulo de inclinación.

Según (Schlaich, Schafer, & Jennewein, 1987, pág. 103) “se debe dimensionar el nodo de manera que se presente un estado plano e hidrostático de esfuerzos, lo cual se alcanza escogiendo la geometría, de tal manera que los esfuerzos en todas las caras sean de igual magnitud”.

2.3.5.1. Zonas nodales hidrostáticas

Ante los esfuerzos de tensión en los tensores donde se anclará el refuerzo, es necesario que la zona nodal tenga la condición de esfuerzos más adecuada. Conforme con (ACI, 2019, pág. 440) se establece que:

Por definición, una zona nodal hidrostática presenta esfuerzos iguales en las caras cargadas y estas caras son perpendiculares al eje de los puntales y tensores que actúan en el nodo. Este tipo de nodos se considera una zona nodal hidrostática, porque los esfuerzos en el plano son iguales en todas direcciones. Ver Figura 2.21.

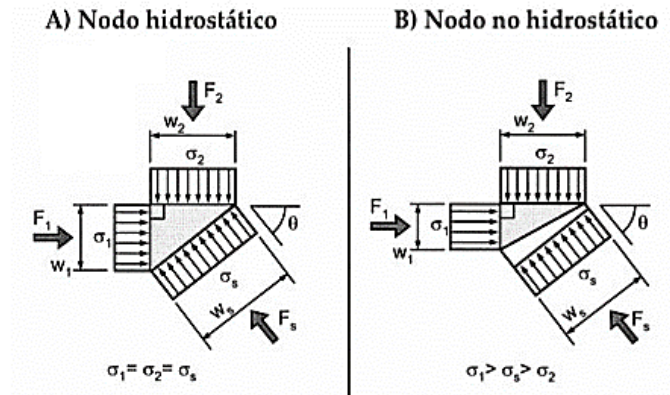


Figura 2.21. Zona nodal hidrostática y no hidrostática (Fuente: Barney & David, 2007, pág. 5).

Estos casos ocurren únicamente cuando la naturaleza del nodo es CCC, sin embargo “se extendieron las zonas nodales hidrostáticas a nodos CCT o CTT, asumiendo que los tensores se prolongan a través de la zona nodal, para ser anclados en su extremo mediante ganchos o adherencia del refuerzo” (Reyes, 2014, pág. 51). Ver Figura 2.22 (b, c).

Un aspecto importante que debe considerarse, específicamente en una zona nodal CCC, es la proporción entre sus anchos y las fuerzas que inciden en cada uno de ellos. En otras palabras al observar la Figura 2.24 (a), podemos plantear que los anchos $w_{n1} : w_{n2} : w_{n3}$ son proporcionales, de la misma forma en que lo son las fuerzas de compresión $C_1 : C_2 : C_3$, esta proporción se denota según la expresión

$$\frac{C_1}{w_{n1}} = \frac{C_2}{w_{n2}} = \frac{C_3}{w_{n3}} \quad (\text{ACI, 2019}).$$

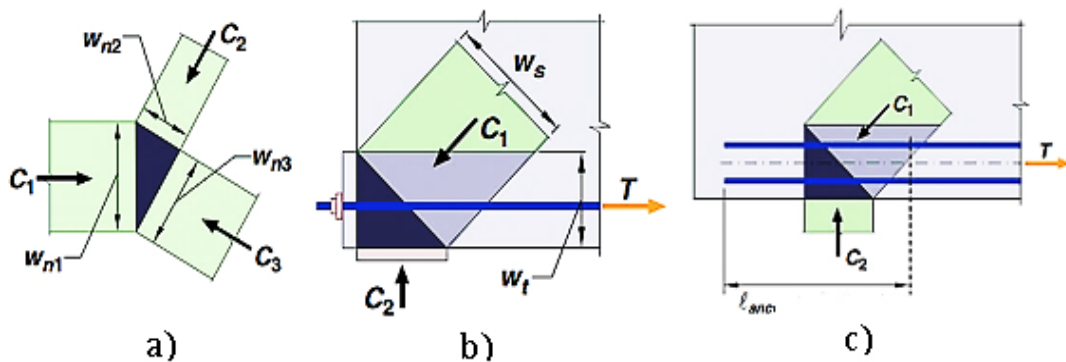


Figura 2.22. Zonas nodales hidrostáticas (Fuente: ACI, 2019, pág. 440).

2.3.5.2. Zonas nodales extendidas

Como se afirma en (ACI, 2019, pág. 439) “una zona nodal extendida es aquella parte de un miembro circunscrita por la intersección del ancho efectivo del puntal W_s y el ancho efectivo del tensor W_t ”. Como podemos apreciar en la Figura 2.23, las zonas nodales extendidas están representadas en color gris claro en el inciso b.

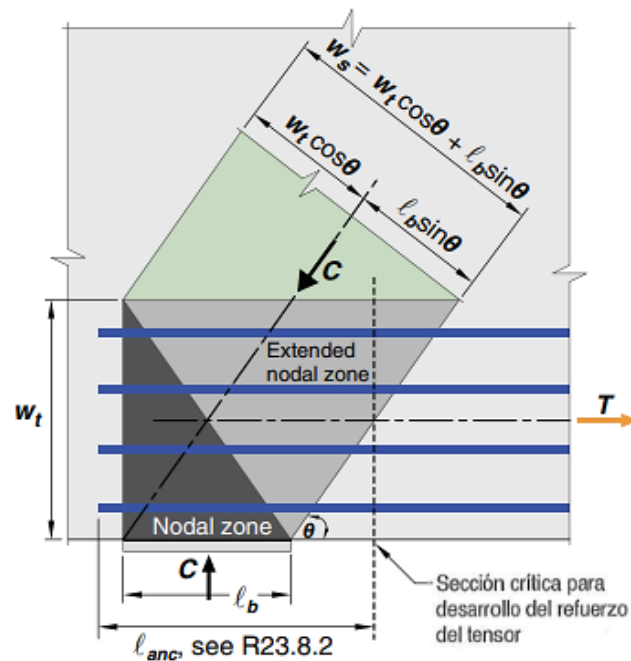


Figura 2.23. Distribución de acero de tensor en zonas nodales (Fuente: ACI, 2019, pág. 441).

2.3.5.3. Resistencia de las zonas nodales

Como nos indica Alcocer & Uribe (2000), también en las zonas nodales debe revisarse que no se excedan los esfuerzos límite. La resistencia del concreto en los nudos depende del nivel de confinamiento, de los efectos de discontinuidad en las deformaciones y de los esfuerzos producidos por el anclaje de los tensores. De acuerdo con (ACI, 2019) la resistencia nominal a compresión de una zona nodal, F_{nn} , se calculará mediante:

$$F_{nn} = f_{ce} A_{nz} \quad \text{(Ec. 2-11)} \\ \text{(Ec- 23.9.1, ACI 318-19)}$$

Donde:

F_{nn} : Resistencia nominal de la zona nodal

f_{ce} : Resistencia efectiva de compresión

A_{nz} : Área de cada cara de zonas nodales

La resistencia efectiva de compresión del concreto en una cara de una zona nodal, f_{ce} , se calculará por:

$$f_{ce} = 0.85 \beta_c \beta_n f'_c \quad \text{(Ec. 2-12)} \\ \text{(Ec- 23.9.2, ACI 318-19)}$$

Tabla 2.4

Coefficientes de la zona nodal β_n (Fuente: ACI, 2019, p. 449).

Configuración de zona nodal	β_n
Zona nodal limitada por puntales, áreas de apoyo, o ambas (CCC)	1.0
Zonas nodales que anclan tensores (CCT)	0.80
Zonas nodales que anclan dos o más tensores (CTT o TTT)	0.60

El área de cada cara de una zona nodal, A_{nz} , en modelos bidimensionales será tomada como la menor entre a) y b):

- El área de la cara de la zona nodal perpendicular a la línea de acción de la fuerza actuante en el nodo.

- b) El área de una sección que atraviesa la zona nodal, tomada en forma perpendicular a la línea de acción de la fuerza resultante en la sección.

En modelos puntal-tensor tridimensionales (cabezales de pilotes):

El área de cada una de las caras de una zona nodal debe ser mayor o igual que la indicada para modelos bidimensionales y las geometrías de cada una de dichas caras deben ser similares a las geometrías de las proyecciones de los extremos de los puntales sobre las correspondientes caras de las zonas nodales (Reyes, 2014).

CAPITULO III

*DESARROLLO DEL SOFTWARE “PILE CAP DESIGN
(PCD)” CON VISUAL STUDIO 2012*

3.1. Microsoft Visual Studio

Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado en un panel de inicio creativo que se puede usar para editar, depurar y compilar código y, después, publicar una aplicación. Un entorno de desarrollo integrado (IDE) es un programa con numerosas características que se pueden usar para muchos aspectos del desarrollo de software. Más allá del editor estándar y el depurador que proporcionan la mayoría de IDE, Visual Studio incluye compiladores, herramientas de finalización de código, diseñadores gráficos y muchas más características para facilitar el proceso de desarrollo de software.

En palabras más específicas, Visual Studio es un conjunto completo de herramientas de desarrollo para la generación de aplicaciones web ASP.NET, Servicios Web XML, aplicaciones de escritorio y aplicaciones móviles. Visual Basic, Visual C# y Visual C++ todos utilizan el mismo entorno de desarrollo integrado (IDE), que habilita el uso compartido de herramientas y facilita la creación de soluciones en varios lenguajes. Asimismo, dichos lenguajes utilizan las funciones de .NET Framework, las cuales ofrecen acceso a tecnologías clave para simplificar el desarrollo de aplicaciones web ASP y Servicios Web XML.

3.1.1. Microsoft .NET

El Microsoft .NET Framework, es un componente de software que puede ser o es incluido en los sistemas operativos Microsoft Windows. Provee soluciones pre-codificadas para requerimientos comunes de los programas y gestiona la ejecución de programas escritos específicamente para este framework. Su objetivo es crear un marco de desarrollo de software sencillo, reduciendo las vulnerabilidades y aumentando la seguridad de los programas desarrollados.

Las soluciones pre-codificadas que forman la biblioteca .NET, cubren un gran rango de necesidades de la programación de programas. Los programadores las emplean y combinan con sus propios códigos en sus programas. El framework incluye soluciones en áreas como: la interfaz de usuario, acceso a datos,

conectividad a bases de datos, criptografía, desarrollo de aplicaciones web, algoritmos numéricos y comunicación de redes.

3.1.2. Principales componentes del marco de trabajo

Consta de las siguientes: la biblioteca de clases de .NET Framework, *CLR* (Common Language Runtime) y características avanzadas como *ADO.NET* (para acceso a bases de datos) *ASP.NET* (para generar páginas activas) y *WinForms* (para construir aplicaciones Windows).

3.1.3. Descripción de los componentes

- La biblioteca de clases de .NET Framework: es una colección de tipos reutilizables que se integran estrechamente con Common Language Runtime. La biblioteca de clases está orientada a objetos, lo que proporciona tipos de los que su propio código administrado deriva funciones. Esto hace que los tipos de .NET Framework sean fáciles de usar y reduce el tiempo asociado con el aprendizaje de las nuevas características de .NET Framework. Además, los componentes de terceros se integran sin dificultades con las clases de .NET Framework.
- CLR (Common Language Runtime): administra la memoria, ejecución de subprocesos, ejecución de código, comprobación de la seguridad del código, compilación y demás servicios del sistema. Estas características son intrínsecas del código administrado que se ejecuta en Common Language Runtime.
- CLS (Common Language Specification): define un conjunto de características que son necesarias para muchas aplicaciones comunes. También proporciona una especie de receta para cualquier lenguaje que se implementa sobre .NET sobre qué necesita para ser compatible.

3.2. Visual Basic .NET

En 2002 se publicó por primera vez Visual Studio .NET, intentando corregir las desventajas que los lenguajes de programación de Visual Studio tenían como ciertos errores en la creación de aplicaciones y limitaciones en el uso de controles, etc.

Ahora todo está bajo un Framework (actualmente viene con el sistema operativo): un conjunto bibliotecas y funciones que facilitan las tareas del programador, ganando en fiabilidad con el tratamiento de muchos tipos de datos.

Visual Basic evolucionó a partir del lenguaje Basic incorporando numerosas instrucciones, funciones y palabras clave directamente relacionadas con la interfaz gráfica de Windows. Actualmente, ofrece capacidades de diseño completamente orientado a objetos y acceso directo a Microsoft .NET Framework, entorno que proporciona un amplio conjunto de interfaces de programación de aplicaciones para Windows e Internet.

3.2.1. Lenguaje de programación orientado a objetos

La programación Orientada a objetos se define como un paradigma de la programación, una manera de programar específica, donde se organiza el código en unidades denominadas clases, de las cuales se crean objetos que se relacionan entre sí para conseguir los objetivos de las aplicaciones. Es una forma especial de programar, más cercana a como expresaríamos las cosas en la vida real que otros tipos de programación.

Existe un acuerdo acerca de qué características contempla la programación orientada a objetos. Las características siguientes son las más importantes: polimorfismo, abstracción, encapsulación y herencia; y los conceptos básicos que las forman: clases, objetos, mensajes, instancias y métodos.

3.2.2. Características

Características específicas de la programación orientada a objetos:

Polimorfismo: Se refiere a la propiedad por la que es posible enviar mensajes sintácticamente iguales a objetos de tipos distintos. El único requisito que deben cumplir los objetos que se utilizan de manera polimórfica es saber responder al mensaje que se les envía.

Abstracción: La abstracción a objetos expresa las características esenciales de un objeto, las cuales distinguen al objeto de los demás (la abstracción genera la ilusión de simplicidad). Además de distinguir entre los objetos provee límites conceptuales. Entonces se puede decir que la encapsulación separa las características esenciales de las no esenciales dentro de un objeto. Si un objeto tiene más características de las necesarias los mismos resultarán difíciles de usar, modificar, construir y comprender.

Encapsulamiento: Significa reunir a todos los elementos que pueden considerarse pertenecientes a una misma entidad, al mismo nivel de abstracción. Esto permite aumentar la cohesión de los componentes del sistema.

Herencia: Las clases se relacionan entre sí, formando una jerarquía de clasificación. Los objetos heredan las propiedades y el comportamiento de todas las clases a las que pertenecen. La herencia organiza y facilita el polimorfismo y el encapsulamiento, permitiendo a los objetos que heredan las propiedades y comportamiento de todas las clases a las que pertenecen, ser definidos y creados como tipos especializados de objetos preexistentes.

3.3. Desarrollo del software “Pile Cap Design (PCD)”

Cuando se va a desarrollar un software intervienen diversos aspectos que son necesarios para la codificación y diseño, en PCD se refiere a toda la teoría del método puntal-tensor aplicada al diseño de cabezales de pilotes, de la cual se deriva la secuencia de pasos a seguir y las ecuaciones para llevar a cabo el diseño; el proceso de desarrollo de PCD consta de 5 fases.

3.3.1. Análisis

Se planificó la forma de llevar las ideas al software, especialmente la teoría, requerimientos, especificaciones y criterios que se utilizan en el método puntal-tensor para el diseño de cabezales de pilotes. De esta etapa depende en gran medida el logro de los objetivos finales.

3.3.2. Diseño

En esta fase se realizó todo el diseño del software, es decir la interfaz con la que el usuario interacciona donde le permite manipular y controlar el software, está diseñada de tal manera que se espera proveer al usuario un conocimiento sobre la percepción del software. Está diseñada con ciertos estándares los cuales se toman en cuenta para ofrecer un diseño de calidad y amigable en cuestión de colores y tamaño.

De acuerdo a los requerimientos planteados en la fase anterior, se idealizó la secuencia lógica de pasos que el usuario deberá seguir al utilizar el software.

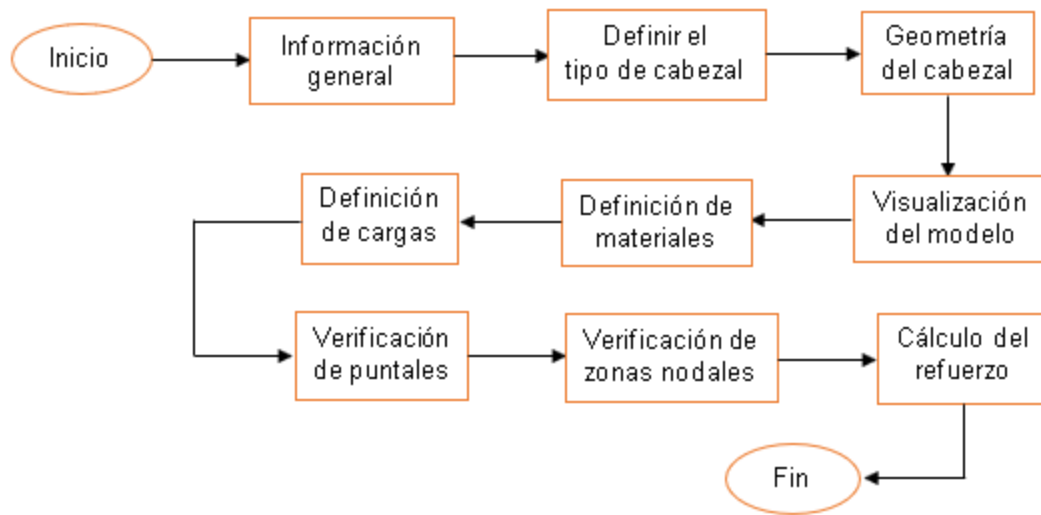


Figura 3.1. Diagrama de flujo para la creación de PCD.

3.3.2.1. Formularios de interfaz

En todo lenguaje de programación visual, ya sea de aplicaciones que corren sobre el entorno gráfico del sistema operativo como de aquellas que lo hacen dentro de un navegador, contamos con un área de trabajo en la cual distribuimos los controles y mostramos la información al usuario.

Para crear la interfaz de PCD se utilizó un objeto o control llamado formulario primario MDI que significa interfaz de múltiples documentos el que actúa como formulario principal, sirve para desplegar varios formularios secundarios.

Los formularios son objetos del tipo contenedor, ya que en ellos se distribuye toda la interfaz de nuestro software, las cuales interactuarán mediante eventos o entrada de datos con los usuarios que las utilicen. Tienen propiedades que determinan aspectos de su apariencia, posición, tamaño y color, entre sus propiedades destacan Backcolor, FormBorderStyle, StartPositionText, Forecolor, visible, Icon, Location, Size entre otras.

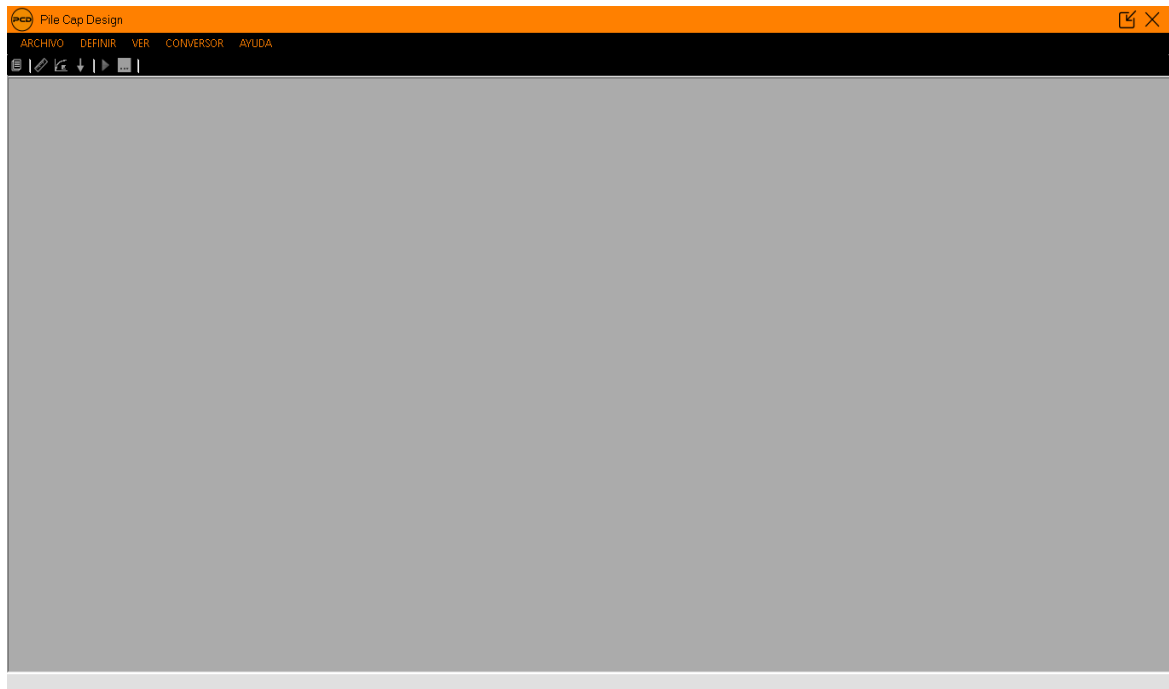


Figura 3.2. Interfaz de PCD (MDIParent).

3.3.2.2. Controles usados para almacenar datos

Son objetos que disponen de sus propiedades y cuya utilidad es la de facilitarnos el desarrollo de las actividades que realiza el software, los más utilizados para esta finalidad son:

- **Módulo:** Es un archivo de Visual Basic donde escribimos especialmente las variables que deseamos que se comparta entre todos los formularios para utilizarse en los diferentes algoritmos.
- **Textbox:** Es un control que muestra información introducida en tiempo de diseño, ingresada por el usuario o asignada al control en código en tiempo de ejecución.
- **ComboBox:** Permite al usuario escribir sobre este o seleccionar una opción de una lista existente de opciones.
- **Button:** Es uno de los controles más utilizados en Visual Basic, sirve para dar inicio a una nueva función, al realizar una acción como darle

clic el código fuente comienza a seguir la estructura de la programación, de igual manera se usa para guardar datos que sean ingresados o calculados.

3.3.2.3. *Controles usados para mostrar información*

Los más usados con este propósito son:

- Panel: Se usa para proporcionar una agrupación identificable para otros controles y se utiliza para subdividir un formulario por función.
- GroupBox: Representa un control contenedor que muestra un marco alrededor de un grupo de controles con un título opcional.
- PictureBox: Permite mostrar una imagen seleccionada desde nuestro ordenador, de Internet o algún recurso incluido en el software que contenga una colección de imágenes. Soporta los formatos más comunes de imágenes (GIF, PNG, JPG, TIF, BMP, ICO) y también permite usar imágenes con transparencias.
- Label: Es un control gráfico que se puede usar para mostrar texto.

3.3.2.4. *Controles usados para crear el modelo puntal-tensor*

Para mostrar el modelo puntal tensor se usaron los siguientes controles:

- LineShape: Permite dibujar líneas en un formulario en tiempo de diseño o tiempo de ejecución.
- OvalShape: Permite dibujar círculos y óvalos en tiempo de diseño o tiempo de ejecución.

Los LineShape y OvalShape representan los miembros y nodos del modelo respectivamente, estos son ubicados mediante coordenadas.

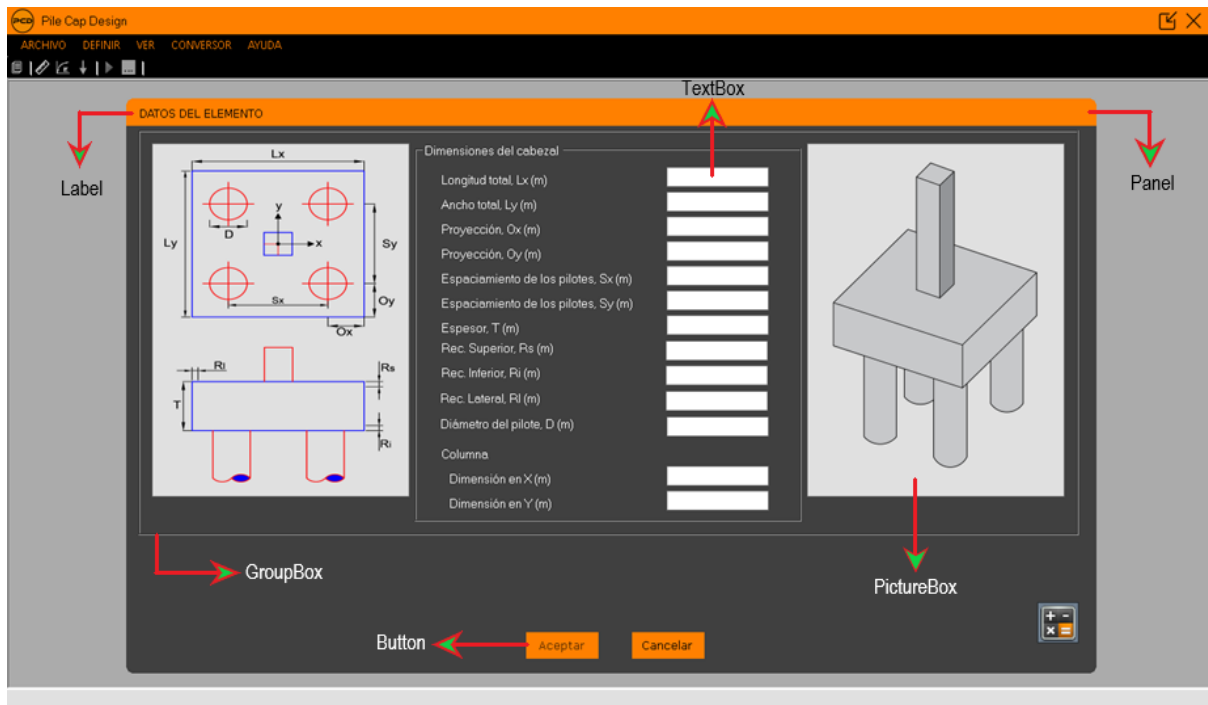


Figura 3.3. Algunos controles usados en PCD.

3.3.3. Programación del código fuente

Esta fase consistió en gran parte del trabajo de desarrollo del software, ya que todo lo diseñado en la fase anterior se transformó en código, extrayendo las fórmulas de la secuencia de pasos, que fueron necesarias para crear los algoritmos que posteriormente fueron traducidos al lenguaje de programación usado VisualBasic.net. El funcionamiento correcto del software depende en gran medida de esta fase, cualquier error en el código influye significativamente en los resultados finales.


```

ElseIf (Me.ComboBox2.Text = "Nodo D" And CCC.Text = "Por acción de columna") Then
    If Module1.DcCCCcol3P > 0 And Module1.DcCCCcol3P < 0.3 Then
        Vista3D.OvalShape43p.FillColor = Color.White
        Vista3D.lblND3P.Text = 100 * Module1.DcCCCcol3P & "%"
        Vista3D.lblND3P.Visible = True
    ElseIf Module1.DcCCCcol3P > 0.3 And Module1.DcCCCcol3P < 0.5 Then
        Vista3D.OvalShape43p.FillColor = Color.Cyan
        Vista3D.lblND3P.Text = 100 * Module1.DcCCCcol3P & "%"
        Vista3D.lblND3P.Visible = True
    ElseIf Module1.DcCCCcol3P > 0.5 And Module1.DcCCCcol3P < 0.7 Then
        Vista3D.OvalShape43p.FillColor = Color.Lime
        Vista3D.lblND3P.Text = 100 * Module1.DcCCCcol3P & "%"
        Vista3D.lblND3P.Visible = True
    ElseIf Module1.DcCCCcol3P > 0.7 And Module1.DcCCCcol3P < 0.9 Then
        Vista3D.OvalShape43p.FillColor = Color.Yellow
        Vista3D.lblND3P.Text = 100 * Module1.DcCCCcol3P & "%"
        Vista3D.lblND3P.Visible = True
    ElseIf Module1.DcCCCcol3P > 0.9 And Module1.DcCCCcol3P < 1 Then
        Vista3D.OvalShape43p.FillColor = Color.DarkOrange
        Vista3D.lblND3P.Text = 100 * Module1.DcCCCcol3P & "%"
        Vista3D.lblND3P.Visible = True
    ElseIf Module1.DcCCCcol3P > 1 Then
        Vista3D.OvalShape43p.FillColor = Color.Red
        Vista3D.lblND3P.Text = 100 * Module1.DcCCCcol3P & "%"
        Vista3D.lblND3P.Visible = True
    End If
End If

```

Figura 3.4. Lenguaje de VisualBasic.net (Revisión de zonas nodales).

3.3.4. Prueba del software

Es un proceso crítico para la garantizar la calidad del software, se enfoca sobre la lógica interna y las funciones externas, las pruebas realizadas a PCD se efectuaron con datos que llevan a condiciones límites a fin de probar su rendimiento, datos que provocarían condiciones eventuales o particulares poco comunes y a las que el software normalmente no estará sometido pero pueden ocurrir, esto se realizó con la intención de descubrir si se generan errores en la estructura del código y con ello solucionarlos.

3.3.5. Instalación

Constituye el final del desarrollo del software, es el proceso por el cual PCD es transferido apropiadamente al ordenador. Se utilizó InstallShield que es una herramienta para crear instaladores de software ya sea de escritorio o las plataformas del servidor de Microsoft Windows.

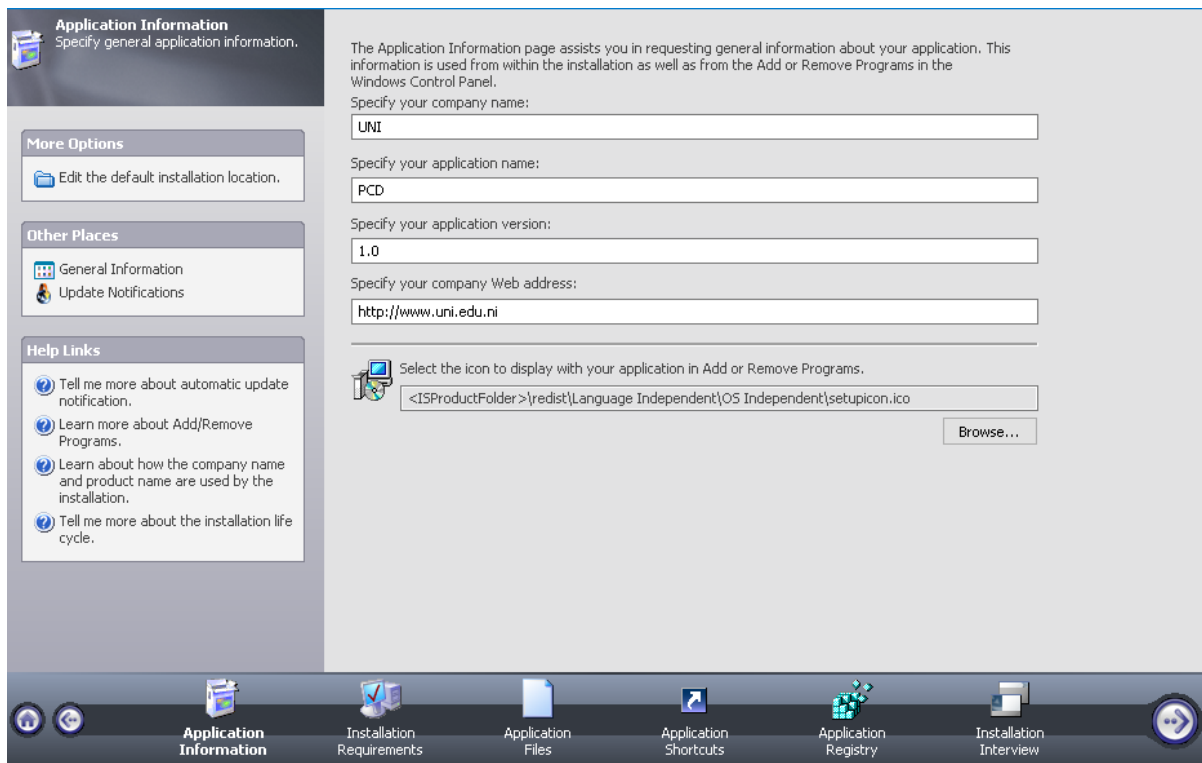


Figura 3.5. Creación del instalador de PCD con la herramienta InstallShield.

3.4. Ventajas y desventajas de Pile Cap Design “PCD”

Como es normal en la primera versión de todo software nunca se está exento de presentar ventajas, pero de igual manera existen limitaciones, en PCD se muestran las siguientes.

3.4.1. Ventajas

- Debido que el software está basado en el código ACI 318-19, los factores de reducción están precodificados en los algoritmos de este, evitando que el usuario ingrese algún factor erróneo.
- No se requiere de un ordenador con grandes capacidades para ejecutar el software.
- PCD posee una interfaz sencilla y fácil de comprender adecuándose al perfil del usuario.

- Los modelos puntal–tensor ya están establecidos según el tipo de cabezal que se quiera realizar, evitando que el usuario proponga un modelo incorrecto.

3.4.2. Desventajas

- Una vez iniciado un proyecto este debe concluirse ya que PCD no genera archivos de respaldo o guardados en su ordenador.
- El software PCD está fundamentado en base al código ACI 318-19, por lo cual se utilizan las unidades del sistema internacional (SI), de tal manera que si se ingresa otro tipo de unidad de medida no se obtendrán resultados lógicos.
- PCD no genera el detallado del acero del cabezal, solo se brinda un ejemplo ilustrativo.
- El cálculo del acero de los tensores esta adecuado a un solo tipo de barra propuesto, por lo cual, si el usuario desea usar distintos tipos de barras, deberá realizar el cálculo de forma manual, usando el área de acero calculada por el software.

3.5. Manual de usuario



3.5.1. Instalación del software

Para instalar el software “Pile Cap Design” en una computadora, es necesario que todos los archivos estén dentro de una carpeta llamada PCD y antes de iniciar el proceso de instalación se debe copiar la carpeta Referencias PCD en el Disco Local (C:).

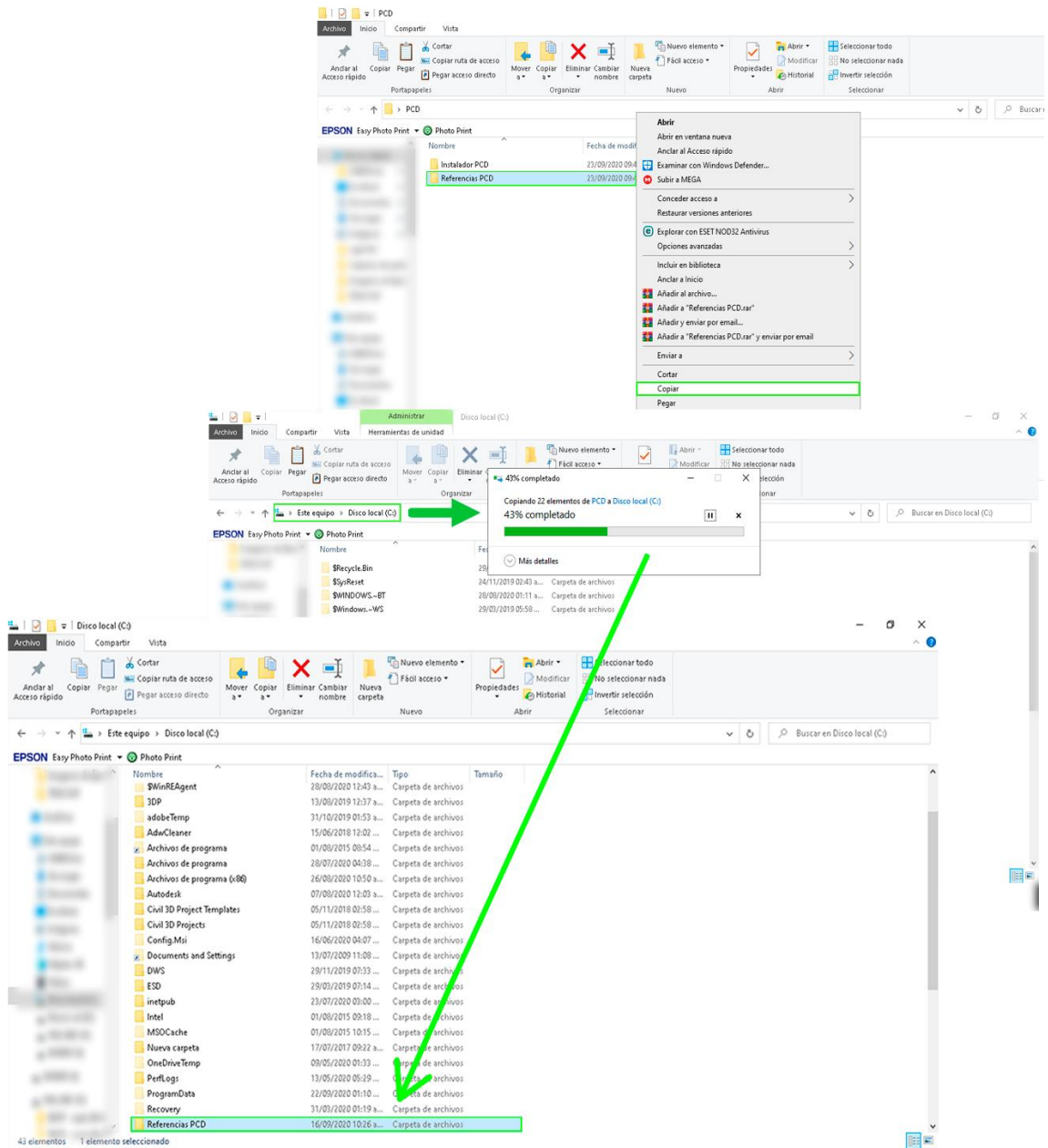


Figura 3.6. Inclusión de referencias de PCD en el Disco Local C.

Después de copiar la carpeta de Referencias PCD, se retorna a la carpeta PCD y se ejecuta como administrador el archivo setup.exe, el cual se encuentra en: PCD > Instalador PCD > Express > SingleImage > DiskImages > DISK1.

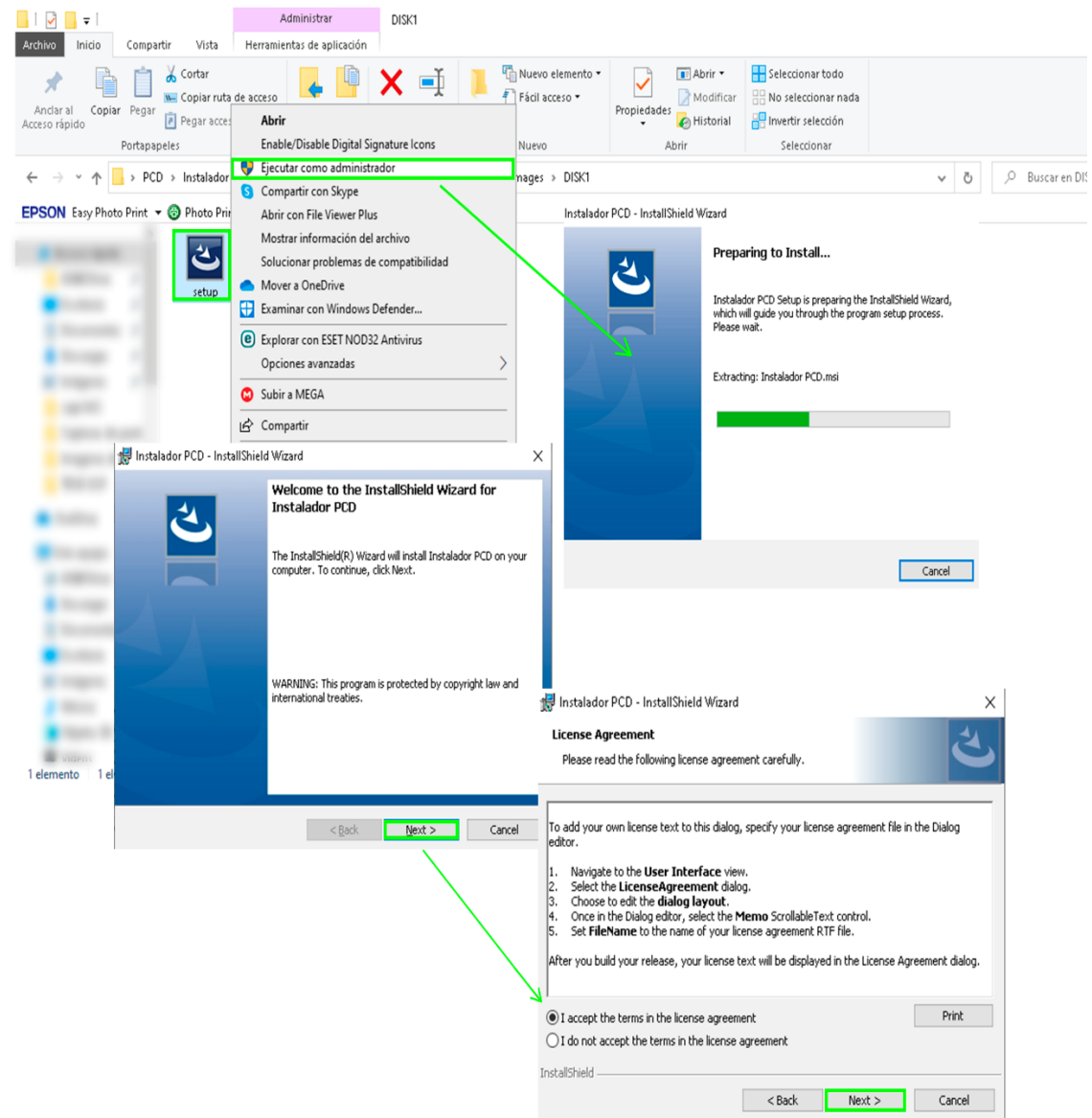


Figura 3.7. Proceso de instalación del software.

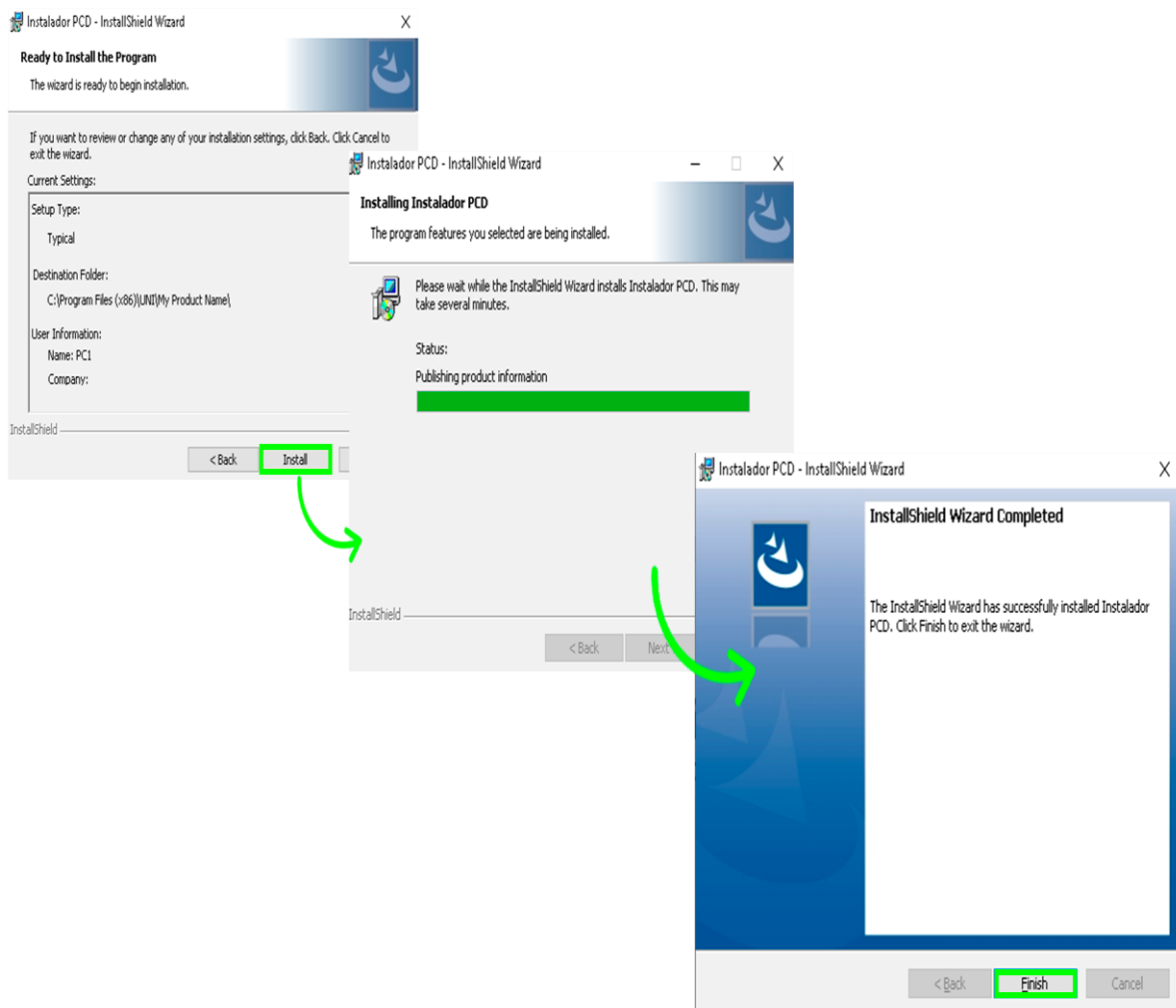


Figura 3.8. Continuación del proceso de instalación del software.

3.5.2. Requisitos de Instalación

El software exige ciertos requisitos mínimos y recomendados para poder ser instalado, de esta manera garantizar un funcionamiento correcto.

3.5.2.1. NET Framework

Net. Framework es un paquete de archivos que necesitan muchas aplicaciones para poder funcionar, si el usuario regularmente actualiza su sistema operativo es muy probable que ya tenga la versión de NET Framework 4.5. de lo contrario se deberá actualizar a dicha versión.

3.5.2.2. Configuración del punto decimal

Muchos ordenadores traen la configuración de forma predetermina de usar la coma para separar los decimales. Por tal motivo se debe cambiar a la separación de decimales con el punto, lo que se puede realizar accediendo a panel de control y buscar la opción "Región", luego "Cambiar método de ordenación" por último en la pestaña "Números" sustituir la coma por el punto en la opción "Símbolo decimal". Todo esto con el fin de evitar algún error en el algoritmo del software.

3.5.2.3. Capacidad del ordenador

Para instalar y ejecutar PCD el ordenador deberá poseer los siguientes requisitos mínimos:

- Windows 8 o superior
- Sistema operativo de 32 o 64 Bits
- .NET Framework versión 4.5 o superior
- 512 MB de memoria libre en Disco Duro
- 1 GB de memoria RAM
- Procesador de 1GHz

3.5.3. Interfaz principal

3.5.3.1. Descripción

La interfaz principal del software está conformada por la barra menú desplegable ubicada en la parte superior izquierda, donde se encuentran las principales herramientas para la manipulación del software. Debajo de esta se ubican los accesos directos. Por último, se encuentra el espacio de trabajo en el centro de la pantalla.

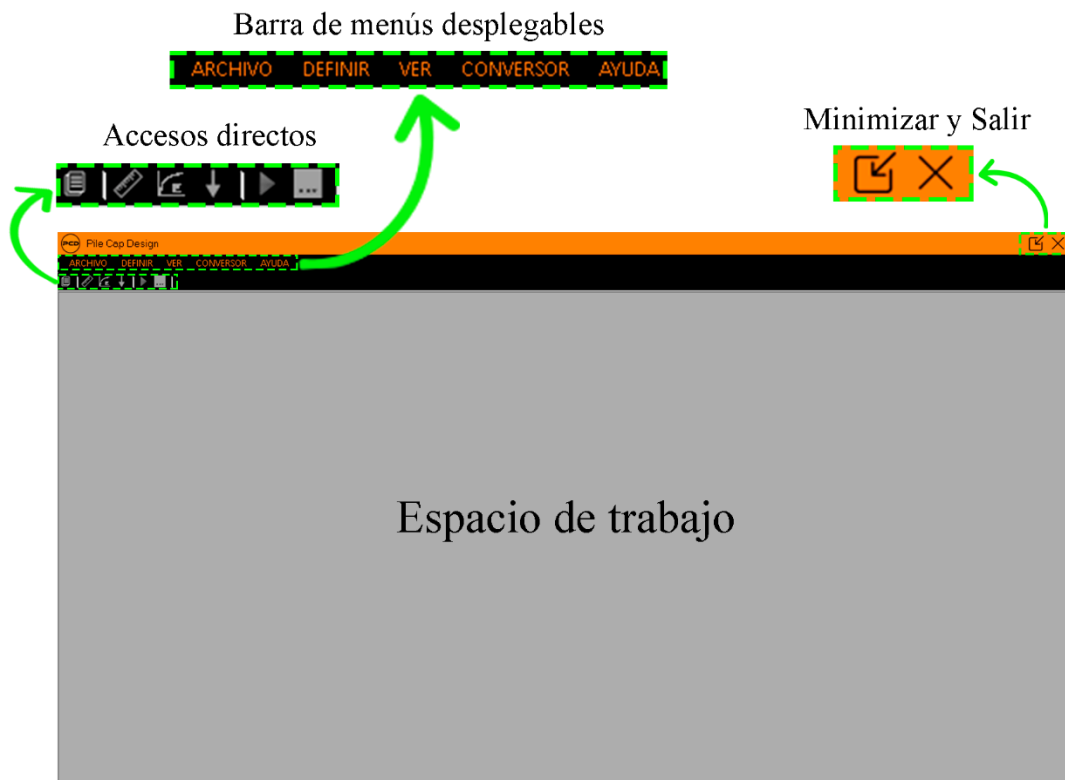


Figura 3.9. Ventana principal.

3.5.3.2. Iconos de accesos directos

El software cuenta con una barra de accesos directos, los cuales facilitan el ingreso de datos. Estos botones solamente se habilitarán una vez que la geometría del cabezal este definida.

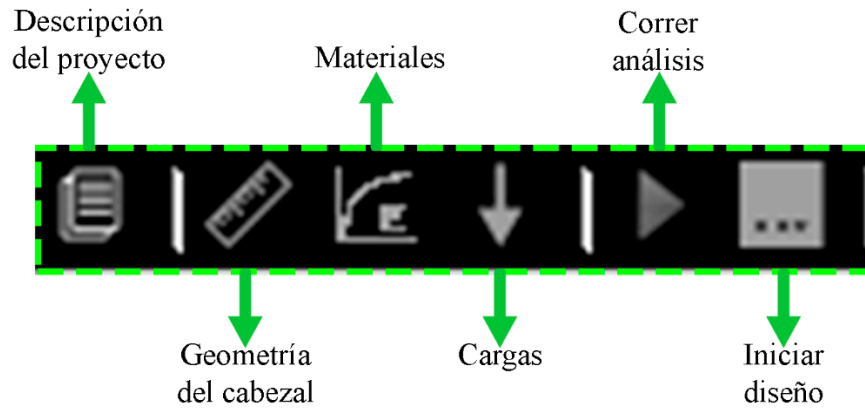


Figura 3.10. Barra de accesos directos.

3.5.3.3. Menús desplegables

Es una barra donde se muestra una serie de opciones que el usuario puede elegir. Está compuesta por el menú ARCHIVO, DEFINIR, VER, CONVERSION Y AYUDA.

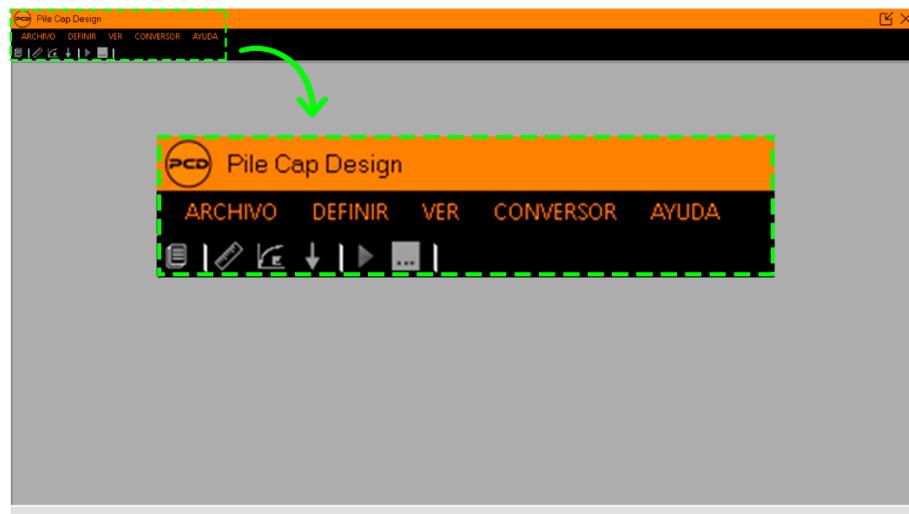


Figura 3.11. Menús desplegables.

3.5.3.3.1. Menú ARCHIVO

En este menú se permite crear un nuevo proyecto, de igual manera está la opción de salir, si deseas cerrar el software.

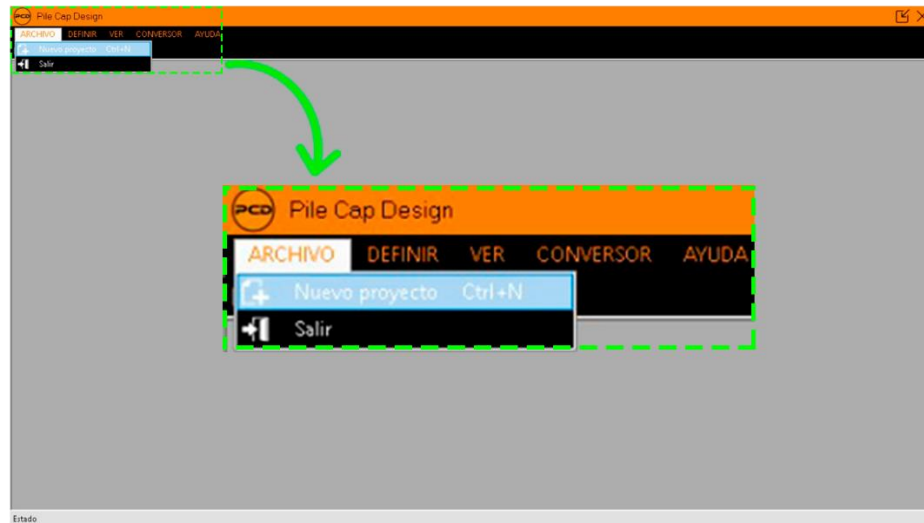


Figura 3.12. Menú ARCHIVO.

3.5.3.3.2. Menú DEFINIR

Desde este menú se puede detallar la geometría del cabezal a diseñar, los materiales utilizados y también las cargas a las cuales está sometido el cabezal.

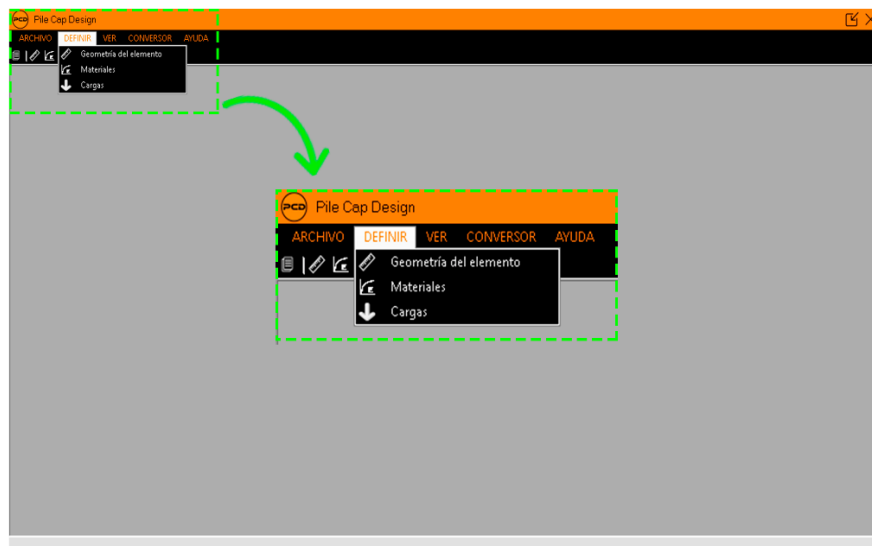


Figura 3.13. Menú DEFINIR.

3.5.3.3.3. Menú VER

Al desplegar en menú, tienes la opción de verificar los puntales y zonas nodales.

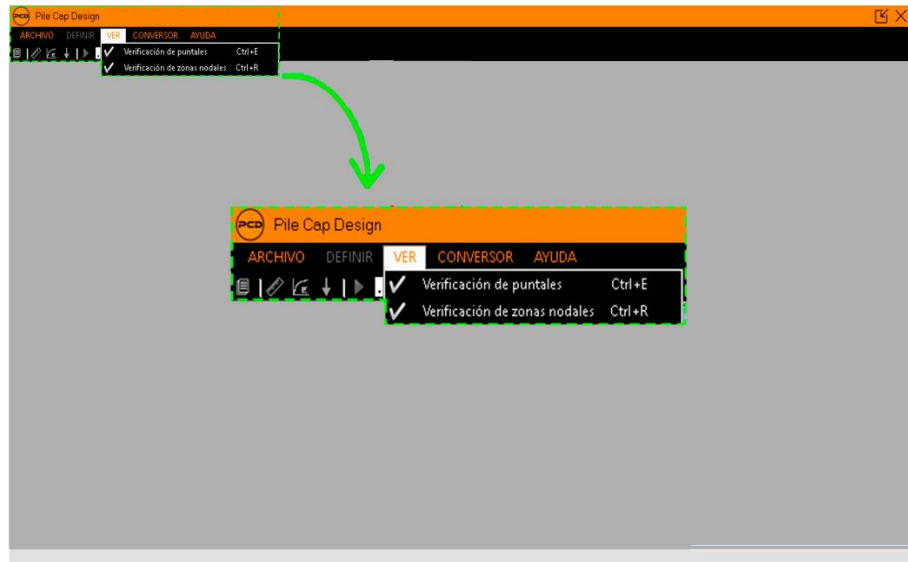


Figura 3.14. Menú VER.

3.5.3.3.4. Menú CONVERSION

Al dar clic sobre este se abre una nueva ventana, en la cual podemos convertir unidades de longitud, peso, presión, fuerza, momento y densidad; lo que le permite al usuario adaptar cualquier diseño al software.

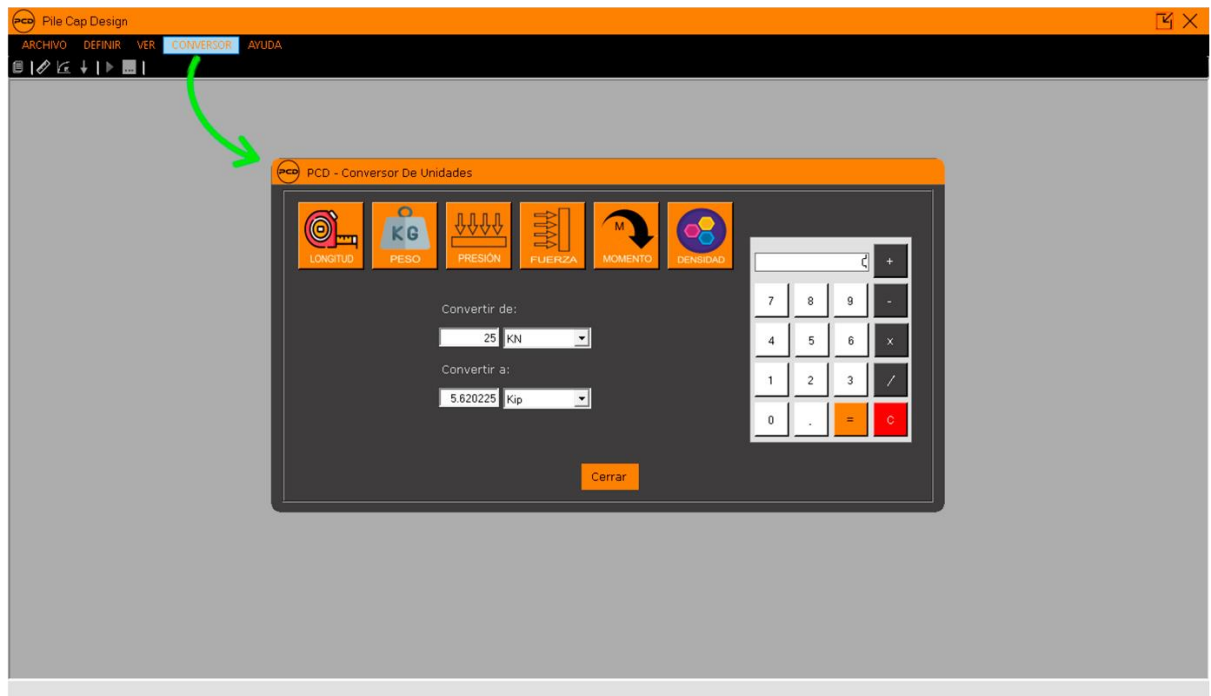


Figura 3.15. Menú CONVERSION.

3.5.3.3.5. Menú AYUDA

El menú AYUDA está conformado por el código ACI 318-19, el manual de usuario y también información del método puntal tensor.

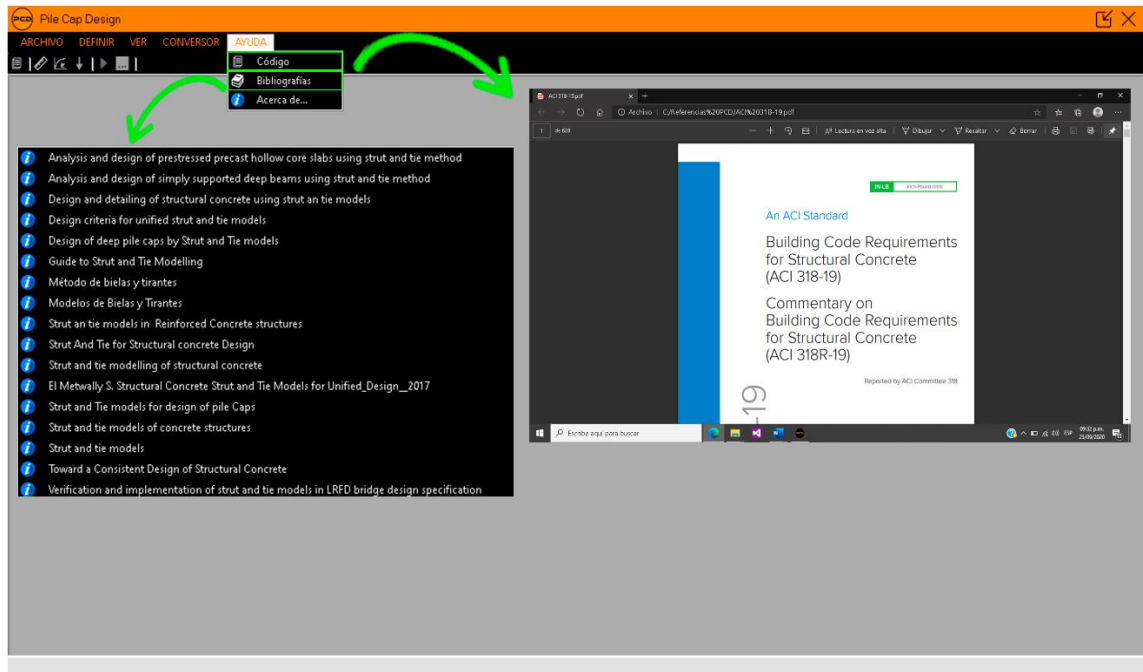


Figura 3.16. Menú AYUDA.

3.5.4. Pasos para la creación de un nuevo proyecto

3.5.4.1. Ingresar datos geométricos del cabezal

Para crear un nuevo proyecto se da clic en archivo luego en Nuevo proyecto o presionar *Ctrl+N*, inmediatamente se muestra una ventana NUEVO PROYECTO donde se ingresan los datos del diseñador, el nombre del proyecto y alguna observación que amerite; dando clic en Aceptar para guardar y a la vez abrir otra ventana TIPO DE CABEZAL, aquí se deberá elegir el cabezal a diseñar, esta cuenta con una lista de tres opciones siendo: cabezal de 3 pilotes, cabezal de 4 pilotes y por ultimo cabezal de 5 pilotes, se presiona Aceptar.

Una vez definido el tipo de cabezal abre una nueva ventana DATOS DEL ELEMENTO para detallar la geometría del cabezal.

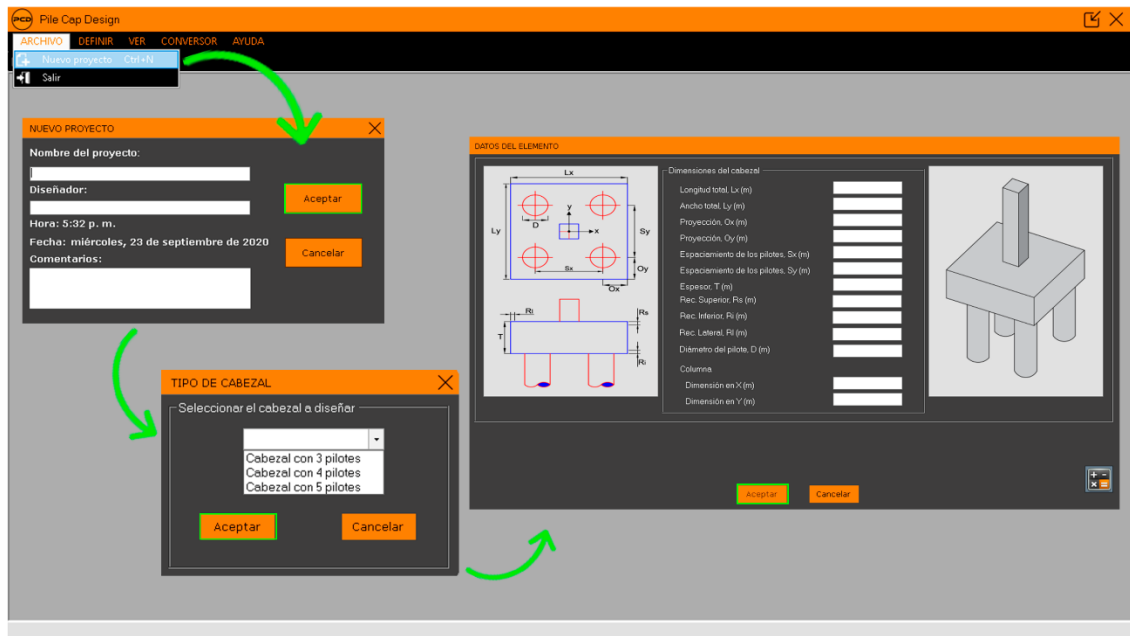


Figura 3.17. Proceso inicial de un nuevo proyecto.

Al presionar Aceptar el espacio de trabajo se dividirá automáticamente por dos ventanas: Vista Lateral donde se muestra las distintas vistas del modelo y Vista 3D que genera un diseño del modelo completo en esta hay botones que permiten moverlo y regular el zoom, así como también activar la visibilidad de los nodos y miembros.

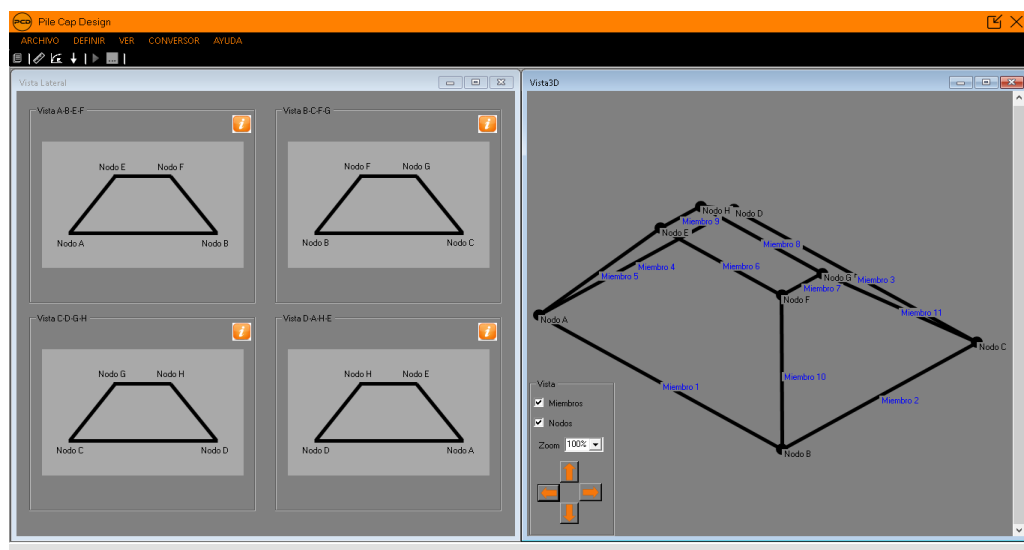


Figura 3.18. Modelo para cabezal de 4 pilotes.

3.5.4.2. Definir materiales

Desde el menú definir en la opción Materiales o bien el acceso directo Materiales se ingresan los datos correspondientes.

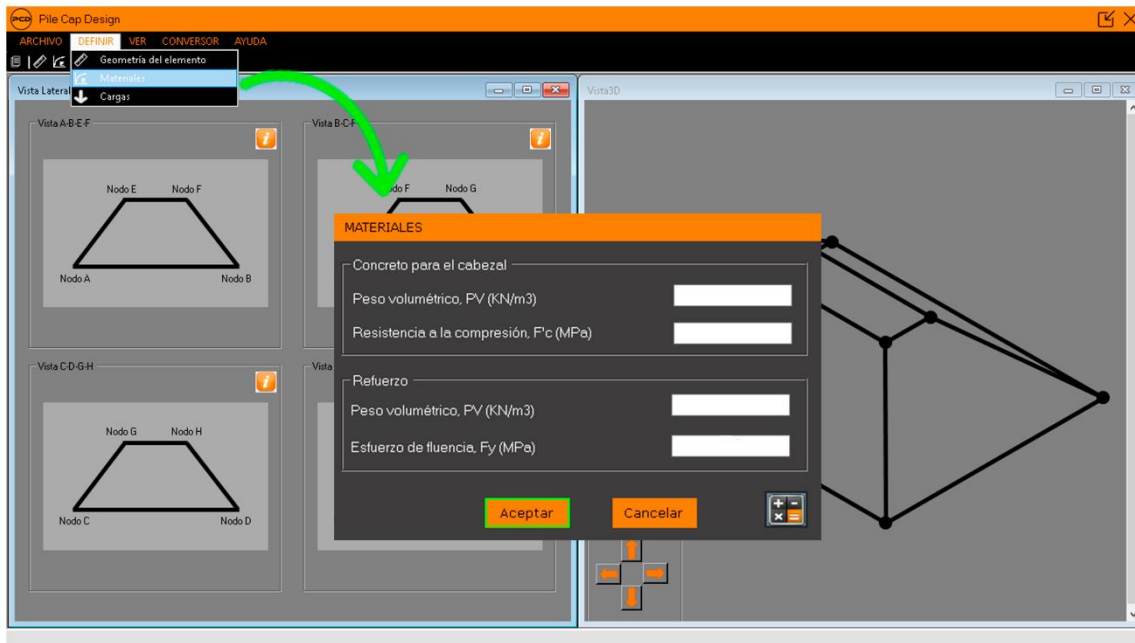


Figura 3.19. Definición de materiales.

3.5.4.3. Definir cargas

Para ingresar las cargas que actúan sobre el cabezal se da clic en la barra de menú DEFINIR, y luego clic en Cargas para abrir la ventana que almacenará dichos datos, los cuales son Carga Muerta y Carga Viva, y si desea considerar un momento; también contiene un botón de Ubicación el cual al presionarlo permite el ingreso de la distancia que estará situada la carga con respecto al borden X y Y0 de la columna, también la ubicación de las resultantes de tensión y compresión luego de ello presionar Aceptar para guardar la ubicación y una vez más presionar Aceptar para guardar todos los datos ingresados.

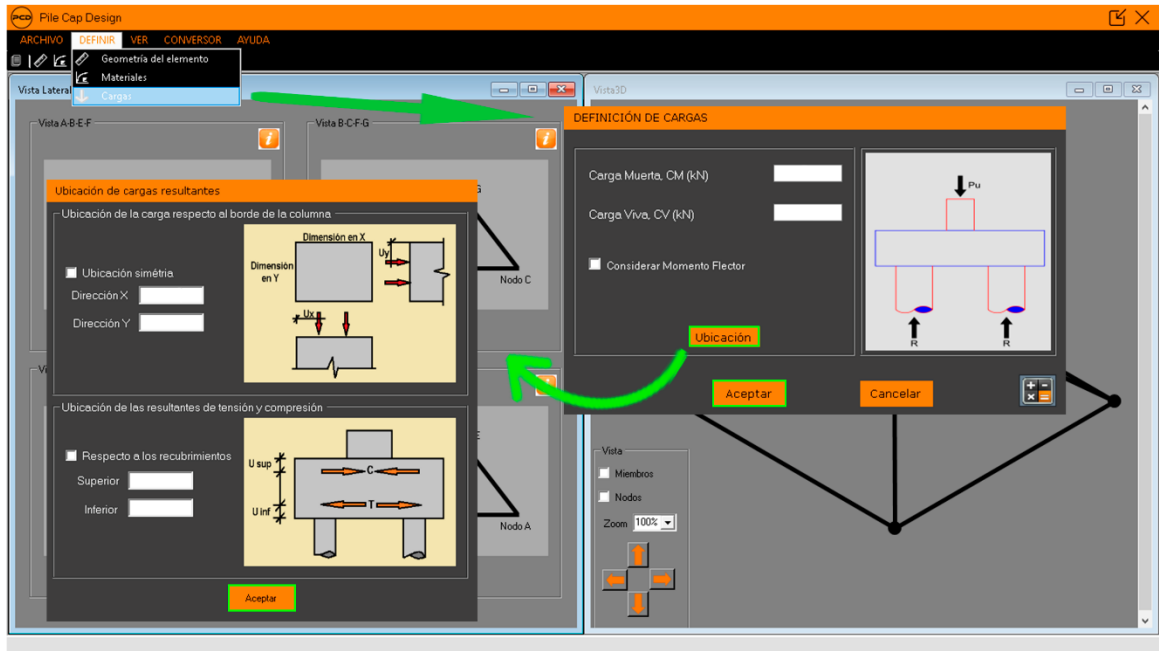


Figura 3.20. Definición de cargas.

3.5.5. Visualización de resultados

3.5.5.1. Análisis

Una vez ingresado todos los datos del modelo, el software inicia el análisis del cabezal a diseñar al presionar el botón Correr Análisis.

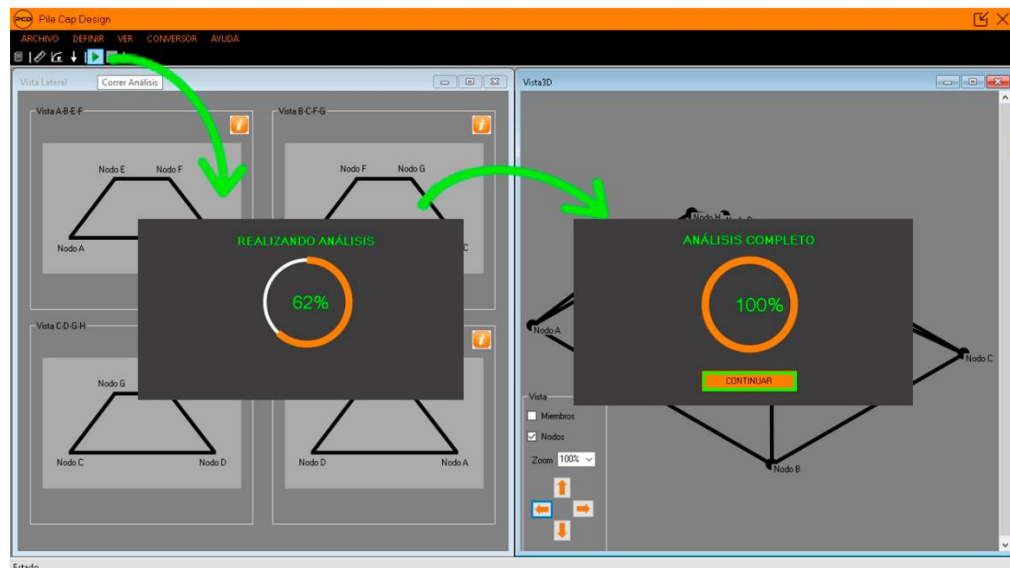


Figura 3.21. Proceso de análisis.

Al finalizar el tiempo de análisis se presiona el botón Continuar. En la vista lateral se refleja los elementos que están sometidos a compresión y tensión, Puntal y Tensor, de color rojo y azul respectivamente. En la vista 3D se muestra los valores de fuerzas de cada miembro.

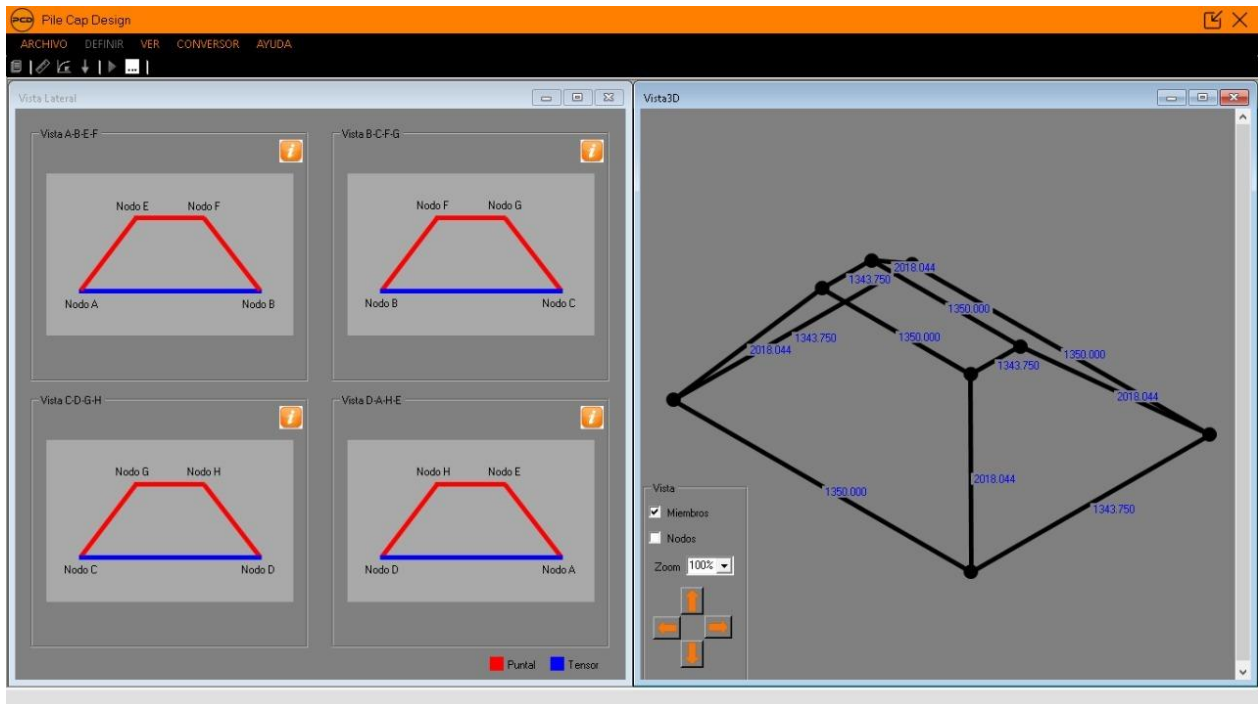


Figura 3.22. Clasificación de miembros y sus valores de fuerzas.

3.5.5.2. Verificación de puntales

Para realizar la verificación de los puntales, en el menú Ver se da clic en Verificación de Puntales, se muestra en la ventana Vista 3D que todos los miembros en compresión toman un color de acuerdo a su demanda capacidad, lo que permite clasificarlos en un rango con ayuda de una escala de colores con porcentajes del 1 al 100%.

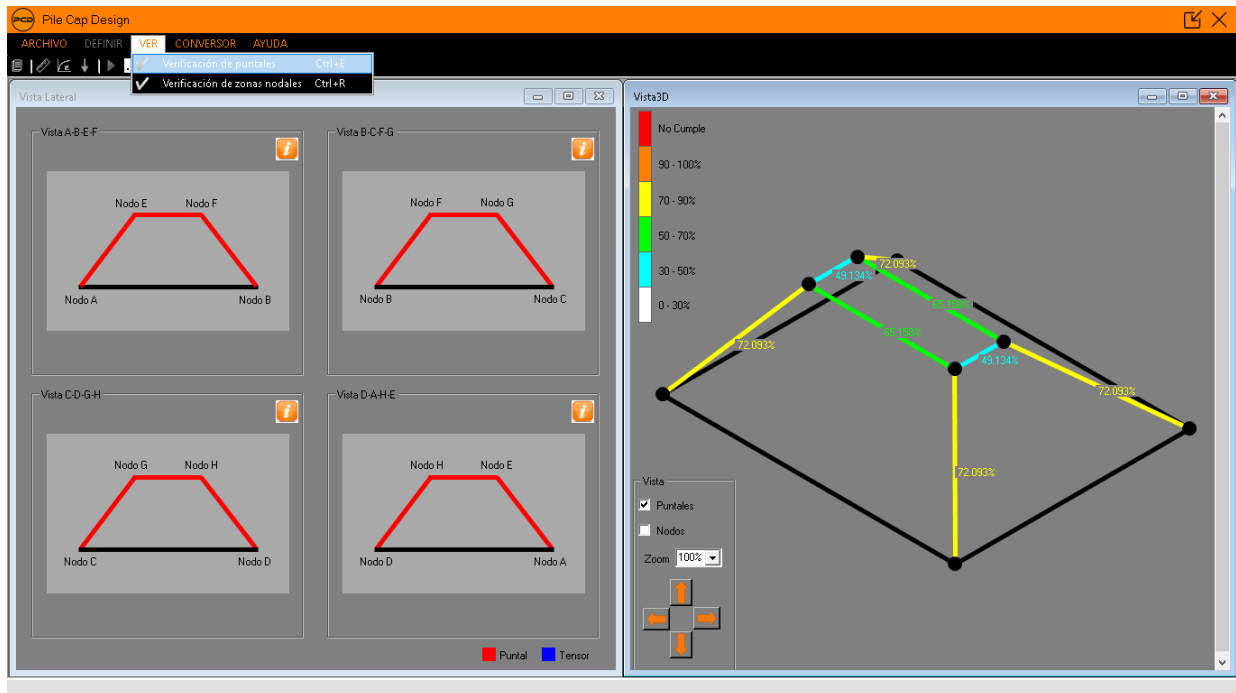


Figura 3.23. Verificación de puntales.

3.5.5.3. Verificación de zonas nodales

Para realizar la verificación de zona nodal, en el menú Ver se da clic en Verificación de zonas nodales, se muestra en la ventana Vista 3D que todos los nodos adquieren un color de acuerdo a su demanda capacidad; para obtener más detalles se da clic en el botón verificación y este a su vez muestra una nueva ventana Zonas nodales en la cual puede seleccionar el nodo a revisar y también la acción a la que está sometido el nodo. Dichos colores permiten clasificarlos en un rango con ayuda de una escala de colores con porcentajes del 1 al 100%.

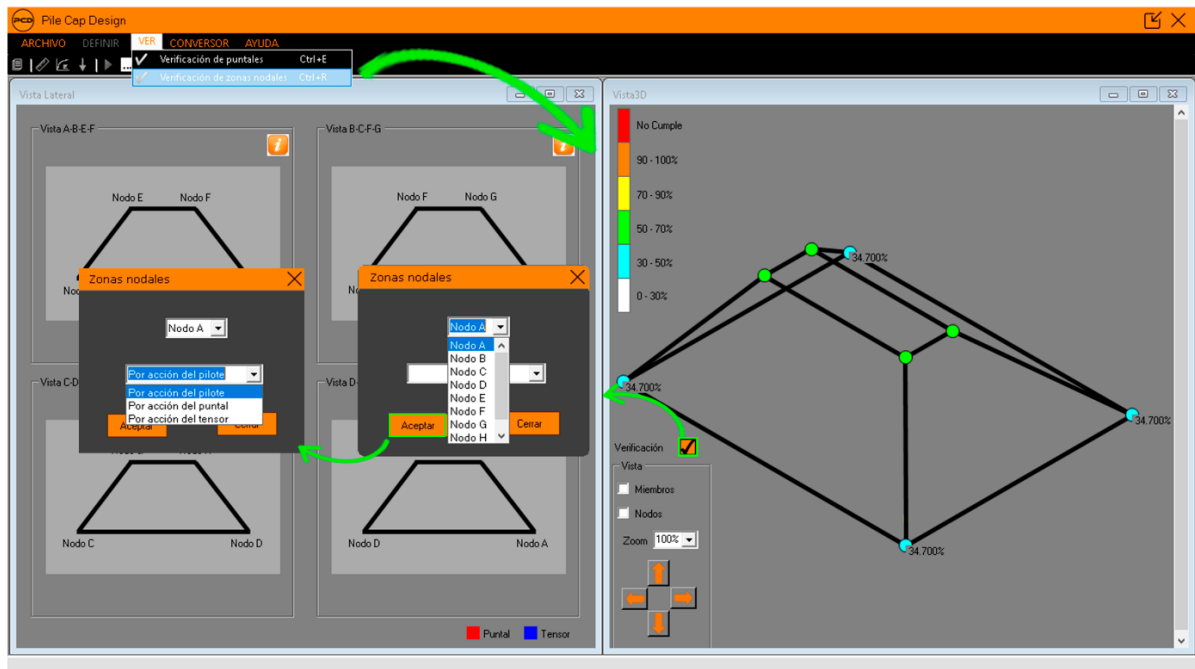


Figura 3.24. Verificación de zonas nodales.

3.5.6. Diseño

Al asegurarse que dichas verificaciones cumplan con su demanda capacidad garantizando un desempeño óptimo de los miembros se procede con el diseño.

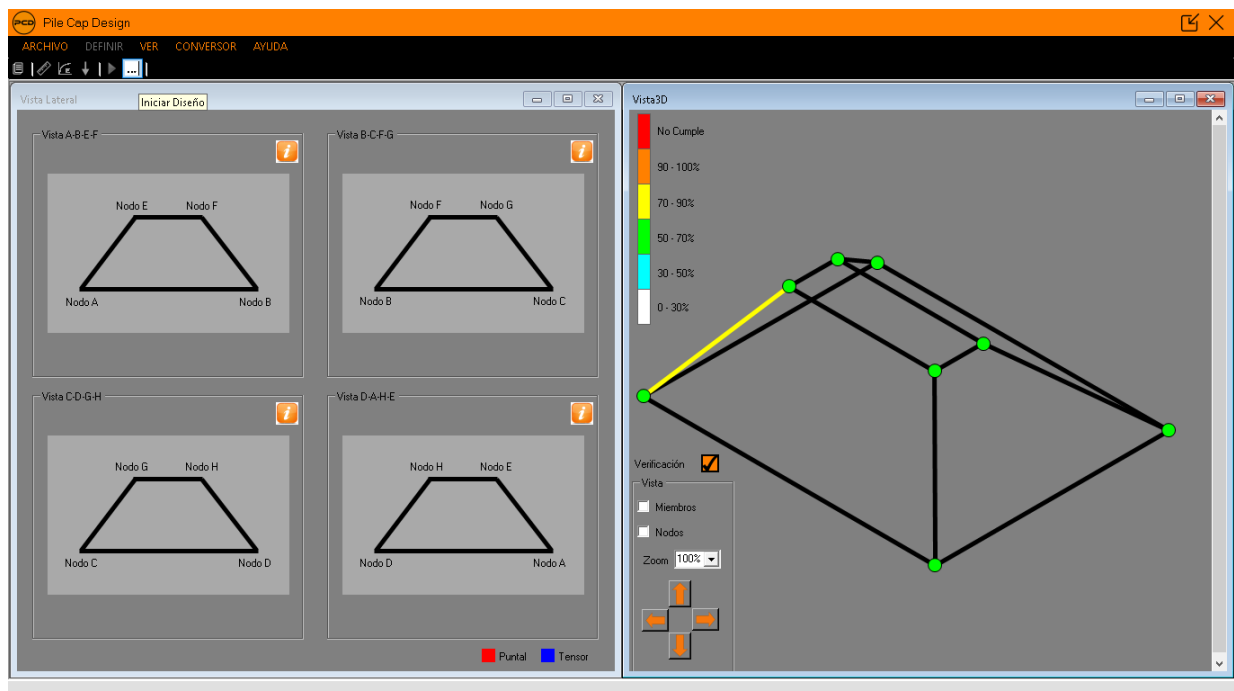


Figura 3.25. Iniciar diseño.

3.5.6.1. Refuerzo

3.5.6.1.1. Refuerzo para tensores

Ya realizado el proceso de diseño PCD muestra una ventana donde se refleja el miembro que se está diseñando, el área de acero que se requiere, cantidad de barras y su respectiva separación que a su vez puede ser verificada al presionar el botón de Revisión, el que indicara a través de un mensaje si cumple o no con los requerimientos del código ACI 318-19, habiendo hecho la revisión dar clic en el botón Avanzar.

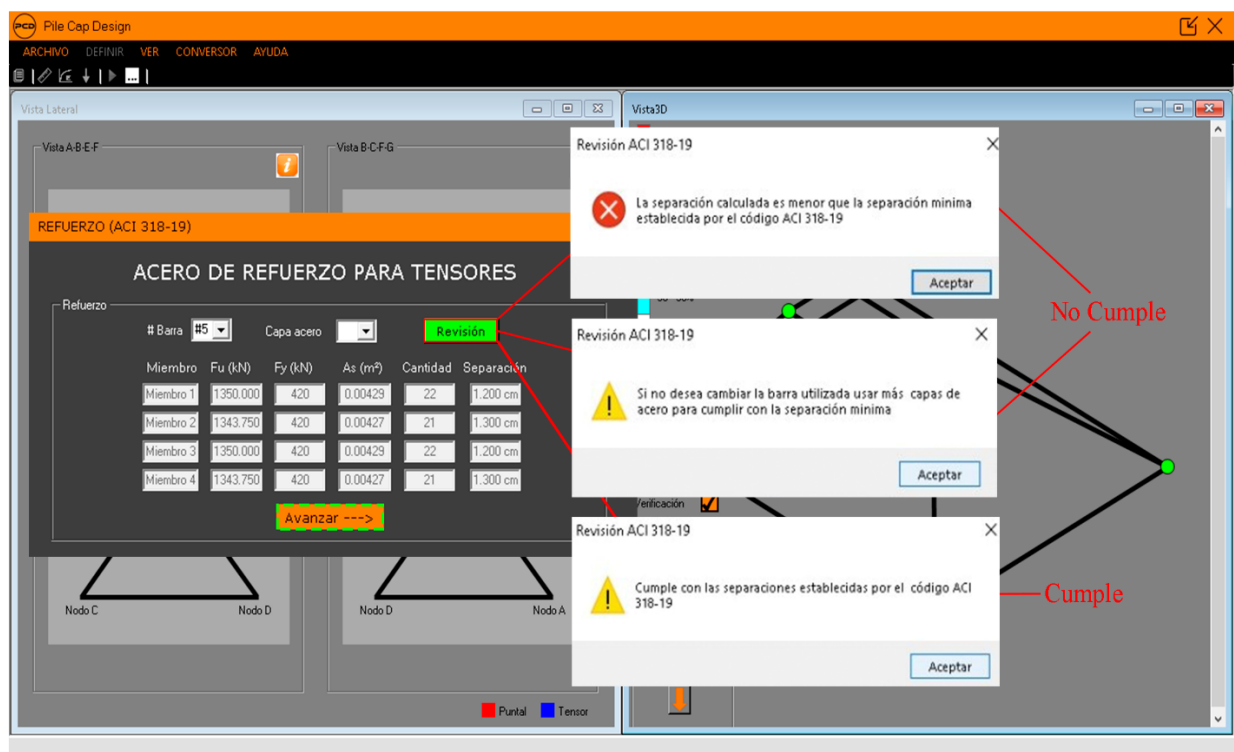


Figura 3.26. Refuerzo para tensores.

3.5.6.1.2. Refuerzo por contracción y temperatura

Para finalizar el diseño se revisa el acero por contracción y temperatura que cumpla con los requerimientos establecidos por el código ACI 318-19 presionando el botón Revisión.

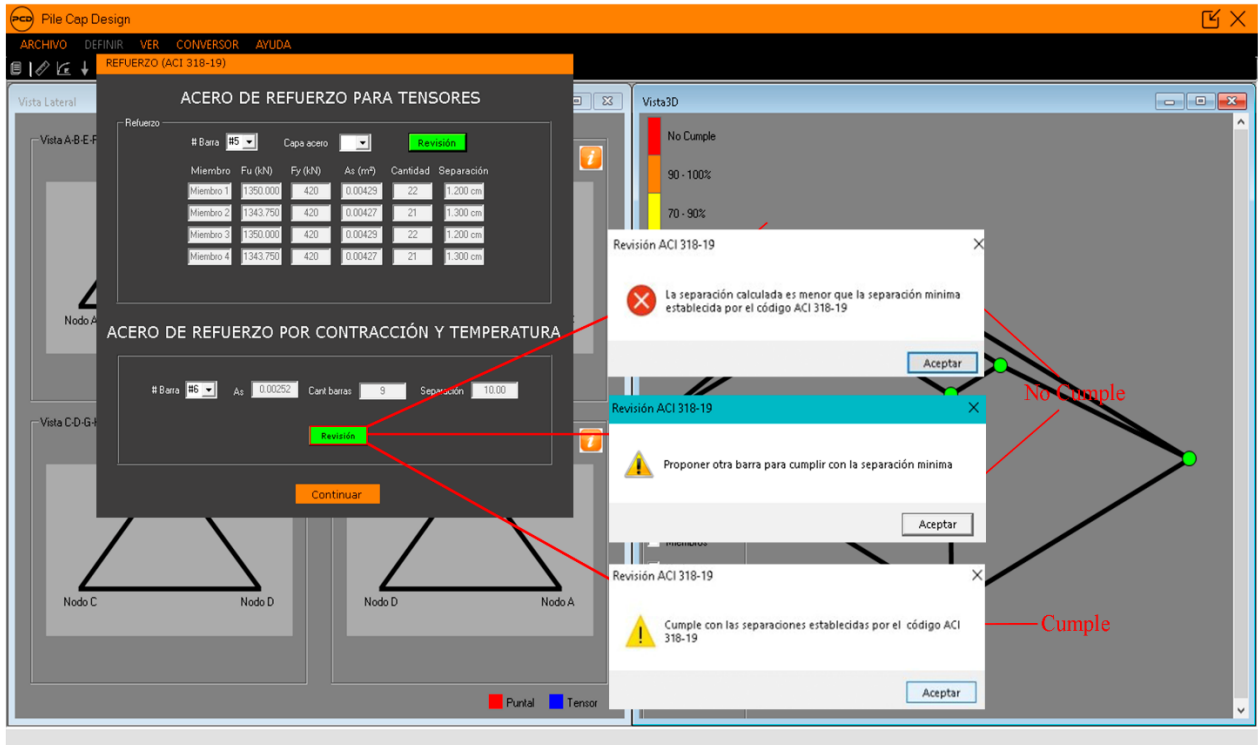


Figura 3.27. Refuerzo por contracción y temperatura.

CAPITULO IV

VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL SOFTWARE

“PILE CAP DESIGN (PCD)”

4.1. Ejemplos de diseño

4.1.1. Ejemplo de diseño para un cabezal de 4 pilotes sometido a carga axial

4.1.1.1. Descripción del ejemplo

Un cabezal con un espesor de 1.4 m, se apoya en cuatro pilotes de 0.6 m de diámetro cada uno y soporta una columna de 1.5 × 0.5 m como se muestra en la figura 4.1. Usando el método Puntal - Tensor 2D calcule el refuerzo y compruebe los nodos y puntales en el cabezal de pilotes.

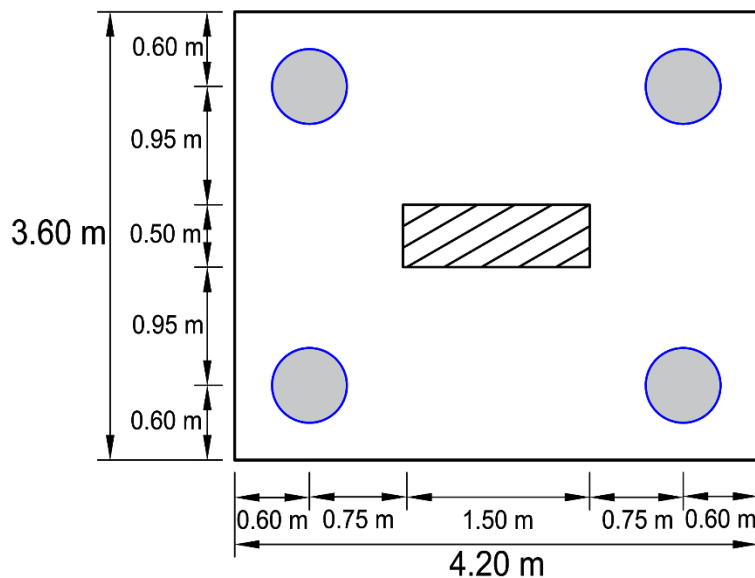


Figura 4.1. Dimensiones del cabezal.

Las propiedades principales de los materiales a utilizar se muestran a continuación:

Tabla 4.1

Datos de materiales.

<i>Materiales</i>	<i>Valor</i>
Concreto	$f_c' = 30 \text{ MPa}$
Acero	$f_y = 420 \text{ MPa}$

El cabezal estará sujeto a las siguientes solicitaciones:

Tabla 4.2

Solicitaciones actuantes.

Cargas	Valor
Peso propio	Considerado dentro del valor de la carga muerta
Carga muerta	1000 kN
Carga viva	3000 kN

4.1.1.2. Selección del modelo puntal tensor compatible con el flujo de esfuerzos

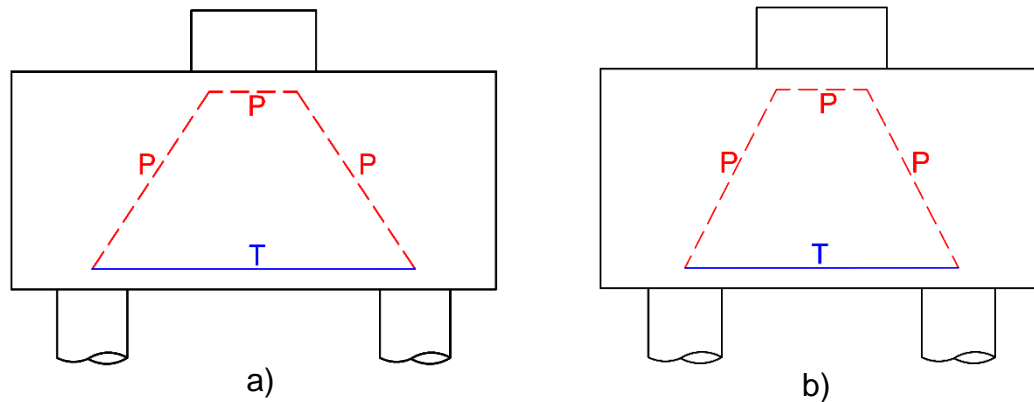


Figura 4.2. Modelo puntal – tensor para el ejemplo de diseño, a) vista del eje X, b) vista del eje Y.

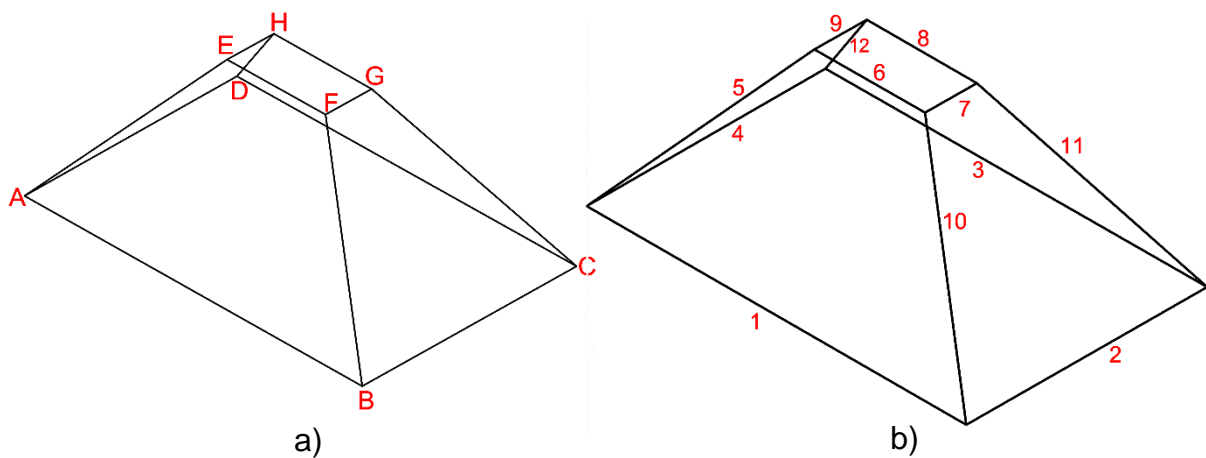


Figura 4.3. Modelo puntal – tensor, a) nodos, b) miembros.

4.1.1.3. Cálculo del ángulo entre el eje del puntal y el eje del tensor en dirección X

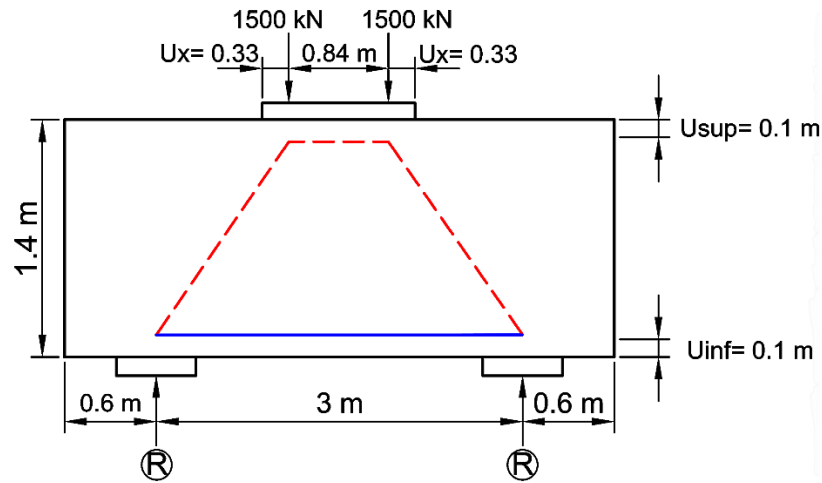


Figura 4.4. Transferencia de fuerza en dirección X.

$$Cax = \left(\frac{\text{Espaciamiento entre los pilotes } x}{2} \right) - \left(\frac{\text{Dim. de la columna en } X}{2} \right) + UX$$

$$Cax = \left(\frac{3m}{2} \right) - \left(\frac{1.5m}{2} \right) + 0.33 = 1.080m$$

$$Cox = \text{Espesor del cabezal} - U_{sup} - U_{inf}$$

$$Cox = 1.4m - 0.1m - 0.1m = 1.2m$$

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{1.2m}{1.080m} \right) = 48.013^\circ$$

4.1.1.4. Cálculo del ángulo entre el eje del puntal y el eje del tensor en dirección Y

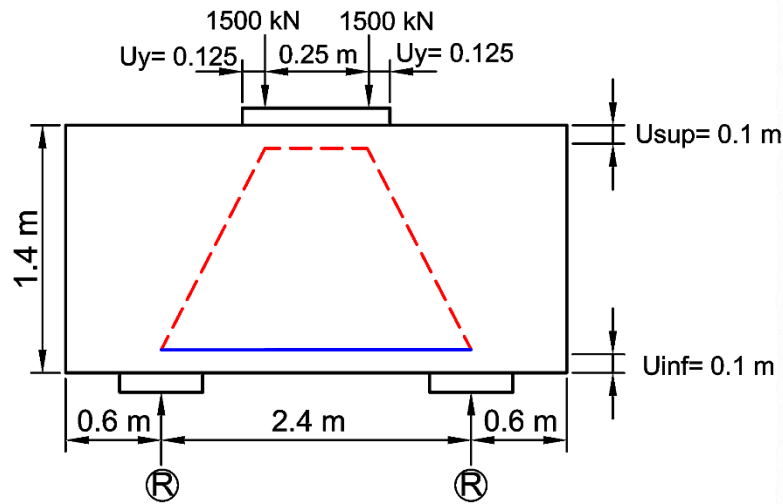


Figura 4.5. Transferencia de fuerza en dirección Y.

$$C_{ay} = \left(\frac{\text{Espaciamiento entre los pilotes } y}{2} \right) - \left(\frac{\text{Dim. de la columna en } y}{2} \right) + U_y$$

$$C_{ay} = \left(\frac{2.4m}{2} \right) - \left(\frac{0.5m}{2} \right) + 0.125 = 1.075m$$

$$C_{oy} = \text{Espesor del cabezal} - U_{sup} - U_{inf}$$

$$C_{oy} = 1.4m - 0.1m - 0.1m = 1.2m$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{1.2m}{1.075} \right) = 48.145^\circ$$

4.1.1.5. Reacciones

$$Nu = 1.2CM + 1.6CV$$

$$Nu = 1.2(1000) + 1.6(3000) = 6000 \text{ kN}$$

$$R = \left(\frac{Nu}{\text{Num. pilotes}} \right)$$

$$R = \left(\frac{6000 \text{ kN}}{4 \text{ pilotes}} \right) = 1500 \text{ kN}$$

4.1.1.6. Cálculo de fuerzas en puntales y tensores en dirección X

Para obtener las fuerzas en los elementos, utilizamos el método estático de los nodos ya que la armadura es isostática.

Equilibrio del nodo A

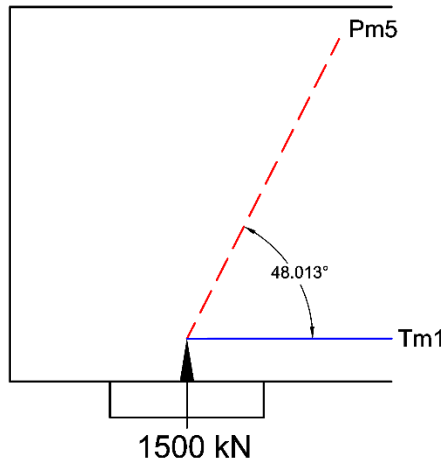


Figura 4.6. Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo A.

$$T_{m1} = 2018.037 \cos(48.013^\circ)$$

$$\sum F_y \uparrow + = 0$$

$$1500 - P_{m5} \sin(48.013^\circ) = 0$$

$$P_{m5} = \left(\frac{1500}{\sin 48.013^\circ} \right)$$

$$P_{m5} = 2018.037 \text{ kN}$$

$$\sum F_x \rightarrow + = 0$$

$$T_{m1} - 2018.037 \cos(48.013^\circ) = 0$$

$$T_{m1} = 1349.990 \text{ kN}$$

Equilibrio del nodo E

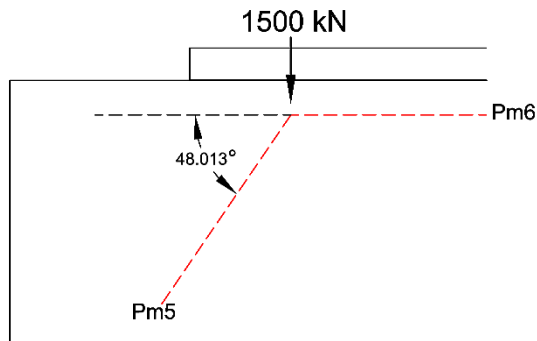


Figura 4.7. Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo E.

$$\sum F_x \rightarrow + = 0$$

$$2018.037 \cos(48.013^\circ) - P_{m6} = 0$$

$$P_{m6} = 2018.037 \cos(48.013^\circ)$$

$$P_{m6} = 1349.990 \text{ kN}$$

Debido a la simetría del cabezal puede decirse que el valor de P_{m5} es igual a P_{m10} , P_{m11} , P_{m12} , de la misma manera T_{m1} es igual a T_{m3} y P_{m6} igual a P_{m8} .

4.1.1.7. Cálculo de fuerzas en puntales y tensores en dirección Y

Equilibrio del nodo B

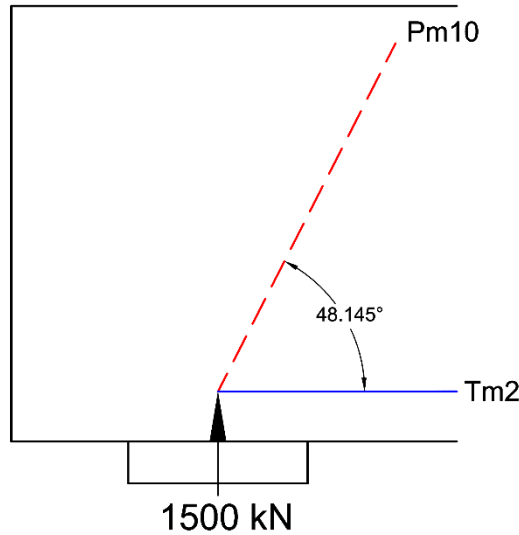


Figura 4.8. Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo A.

$$\sum F_y \uparrow + = 0$$

$$1500 - P_{m10} \sin(48.145^\circ) = 0$$

$$P_{m10} = \left(\frac{1500}{\sin 48.145^\circ} \right)$$

$$P_{m10} = 2013.867 \text{ kN}$$

$$\sum F_x \rightarrow + = 0$$

$$T_{m2} - 2013.867 \cos(48.145^\circ) = 0$$

$$T_{m2} = 2013.867 \cos(48.145^\circ)$$

$$T_{m2} = 1343.748 \text{ kN}$$

Equilibrio del nodo F

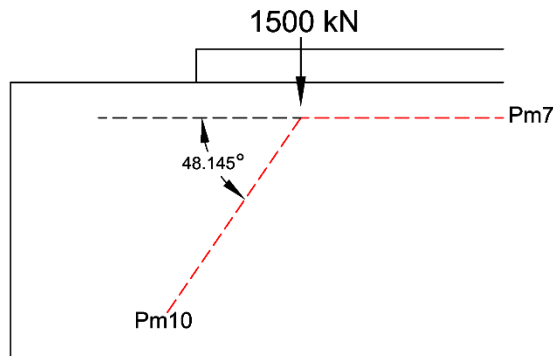


Figura 4.9. Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo F.

$$\sum F_x \rightarrow + = 0$$

$$2013.867 \cos(48.145^\circ) - P_{m7} = 0$$

$$P_{m7} = 2013.867 \cos(48.145^\circ)$$

$$P_{m7} = 1343.748 \text{ kN}$$

Debido a la simetría del cabezal puede decirse que el valor de P_{m10} es igual a P_{m5} , P_{m11} , P_{m12} , de la misma manera T_{m2} es igual a T_{m4} y P_{m7} igual a P_{m9} .

Resultados del cálculo de fuerzas en los puntales y tensores para el eje X y eje Y.

Tabla 4.3

Fuerzas en puntales y tensores en el eje X.

Miembros	Fu (kN)
Tm1	1349.990
Tm3	1349.990
Pm5	2018.037
Pm10	2018.037
Pm11	2018.037
Pm12	2018.037
Pm6	1349.990
Pm8	1349.990

Tabla 4.4

Fuerzas en puntales y tensores en el eje Y.

Miembros	Fu (kN)
Tm2	1343.748
Tm4	1343.748
Pm5	2013.867
Pm10	2013.867
Pm11	2013.867
Pm12	2013.867
Pm7	1343.748
Pm9	1343.748

Para los miembros Pm5, Pm10, Pm11, Pm12 se toma el valor mayor de la fuerza, para diseñar con los miembros con el valor más crítico.

4.1.1.8. Verificación de esfuerzos en los puntales

Después de haber obtenido las fuerzas actuantes en los ejes de los puntales dispuestos, debe garantizarse que la resistencia de estos supere la acción de las fuerzas. Para el caso de los puntales, según el código ACI 318-19, su resistencia está dada en Ec. 2-03; como se mostró en la Tabla 2.1 el coeficiente $\beta_s = 1.0$ para puntales prismáticos, y $\beta_s = 0.75$ para puntales en forma de botella, si la resistencia del concreto es de 30 MPa podemos ver la resistencia de estos puntales en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5

Resistencia efectiva de los puntales.

Puntal	Tipo	$0.85f'_c$	β_c	β_s	ϕ	ϕf_{cu}
P_{m5}	Botella	25,500 KPa	1.00	0.4	0.75	7,650 KPa
P_{m6}	Prismático	25,500 KPa	1.00	1.00	0.75	19,125 KPa
P_{m7}	Prismático	25,500 KPa	1.00	1.00	0.75	19,125 KPa

4.1.1.8.1. Área nominal de cada puntal

- Puntal de botella P_{m5}

$$wsx = (2 * U_{Inf}) \cos \theta x + (D.pilote) \sin \theta x$$

$$wsx = (2 * 0.1) \cos 48.0128^\circ + (0.6) \sin 48.0128^\circ$$

$$wsx = 0.58m$$

$$AP_{m5} = wsx * D.pilote$$

$$AP_{m5} = 0.58 * 0.6$$

$$AP_{m5} = 0.348m^2$$

- Puntal prismático P_{m6}

$$AP_{m6} = (Uy * 4) * (U_{sup} * 2)$$

$$AP_{m6} = (0.125 * 4) * (0.1 * 2)$$

$$AP_{m6} = 0.1 m^2$$

- Puntal prismático P_{m7}

$$AP_{m7} = (Ux * 2) * (U_{sup} * 2)$$

$$AP_{m7} = (0.33 * 2) * (0.1 * 2)$$

$$AP_{m7} = 0.132 \text{ m}^2$$

4.1.1.8.2. Resistencia nominal a la compresión de los puntales

- Puntal de botella P_{m5}

$$f_{ns}P_{m5} = \varphi f_{ce}A_{cs}$$

$$f_{ns}P_{m5} = 7650 \text{ KPa} * 0.348 \text{ m}^2$$

$$f_{ns}P_{m5} = 2662.20 \text{ kN} > 2018.037 \text{ kN} \therefore \text{Ok!}$$

- Puntal prismático P_{m6}

$$f_{ns}P_{m6} = \varphi f_{ce}A_{cs}$$

$$f_{ns}P_{m6} = 19125 \text{ KPa} * 0.1 \text{ m}^2$$

$$f_{ns}P_{m6} = 1912.50 \text{ kN} > 1349.990 \text{ kN} \therefore \text{Ok!}$$

- Puntal prismático P_{m7}

$$f_{ns}P_{m7} = \varphi f_{ce}A_{cs}$$

$$f_{ns}P_{m7} = 19125 \text{ KPa} * 0.132 \text{ m}^2$$

$$f_{ns}P_{m7} = 2524.50 \text{ kN} > 1343.748 \text{ kN} \therefore \text{Ok!}$$

4.1.1.8.3. Demanda – capacidad de los puntales

- Puntal de botella P_{m5}

$$D/CP_{m5} = \frac{f_u}{f_{ns}P_{m5}} * 100$$

$$D/CP_{m5} = \frac{2018.037}{2662.20} * 100$$

$$D/CP_{m5} = 75.803 \%$$

- Puntal de botella P_{m6}

$$D/CP_{m6} = \frac{f_u}{f_{ns}P_{m6}} * 100$$

$$D/CP_{m6} = \frac{1349.990}{1912.50} * 100$$

$$D/CP_{m6} = 70.588 \%$$

- Puntal de botella P_{m7}

$$D/CP_{m7} = \frac{f_u}{f_{ns}P_{m7}} * 100$$

$$D/CP_{m7} = \frac{1343.748}{2524.50} * 100$$

$$D/CP_{m7} = 53.228 \%$$

4.1.1.9. Verificación de zonas nodales

4.1.1.9.1. Área de las caras de la zona nodal

Nodo A tipo CCT

- Reacción en el apoyo

$$AReac\ CCT = \frac{\pi * D.pilote^2}{4}$$

$$AReac\ CCT = \frac{\pi * 0.6^2}{4} = 0.283\ m^2$$

- Tensor

$$ATen\ CCT = (2 * Uinf) * D.pilote$$

$$ATen\ CCT = (2 * 0.1) * 0.6 = 0.120\ m^2$$

- Puntal de botella

$$wsx = (2 * Uinf) \cos \theta x + (D.pilote) \sin \theta x$$

$$wsx = (2 * 0.1) \cos 48.0128^\circ + (0.6) \sin 48.0128^\circ$$

$$wsx = 0.58m$$

$$APun\ CCT = wsx * D.pilote$$

$$APun\ CCT = 0.58 * 0.6 = 0.348\ m^2$$

Nodo E tipo CCC

- Puntal de botella

$$wsx = (2 * Uinf) \cos \theta x + (D.pilote) \sin \theta x$$

$$wsx = (2 * 0.1) \cos 48.0128^\circ + (0.6) \sin 48.0128^\circ$$

$$wsx = 0.58m$$

$$APun\ CCC = wsx * D.pilote$$

$$APun\ CCC = 0.58 * 0.6 = 0.348\ m^2$$

- Puntal prismático

$$APPris\ CCC = (4 * Uy) * (2 * Usup)$$

$$APPris\ CCC = (4 * 0.125) * (2 * 0.1) = 0.1\ m^2$$

- Acción de la carga

$$ACarga\ CCC = (4 * Uy) * (2 * Ux)$$

$$ACarga\ CCC = (4 * 0.125) * (2 * 0.333) = 0.333\ m^2$$

4.1.1.9.2. Resistencia nominal de la zona nodal

Nodo A tipo CCT

- Reacción en el apoyo

$$F_{nn}\ Reac\ CCT = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f_c' * A_{Reac\ CCT}$$

$$F_{nn}\ Reac\ CCT = 0.75 * 0.85 * 1 * 0.8 * (30 * 1000) * 0.283 = 4329.90\ kN$$

- Tensor

$$F_{nn}\ Ten\ CCT = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f_c' * A_{Ten\ CCT}$$

$$F_{nn}\ Ten\ CCT = 0.75 * 0.85 * 1 * 0.8 * (30 * 1000) * 0.120 = 1836\ kN$$

- Puntal de botella

$$F_{nn}\ Pun\ CCT = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f_c' * A_{Pun\ CCT}$$

$$F_{nn}\ Pun\ CCT = 0.75 * 0.85 * 1 * 0.8 * (30 * 1000) * 0.348 = 5324.40\ kN$$

Nodo E tipo CCC

- Puntal de botella

$$F_{nn}\ Pun\ CCC = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f_c' * A_{Pun\ CCC}$$

$$F_{nn}\ Pun\ CCC = 0.75 * 0.85 * 1 * 1 * (30 * 1000) * 0.348 = 6655.50\ kN$$

- Puntal prismático

$$F_{nn}\ PPris\ CCC = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f_c' * A_{PPris\ CCC}$$

$$F_{nn}\ PPris\ CCC = 0.75 * 0.85 * 1 * 1 * (30 * 1000) * 0.1 = 1912.50\ kN$$

- Acción de la carga

$$F_{nn}\ Carga\ CCC = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f_c' * ACarga\ CCC$$

$$F_{nn}\ Carga\ CCC = 0.75 * 0.85 * 1 * 1 * (30 * 1000) * 0.333 = 6368.625\ kN$$

4.1.1.9.3. Demanda – capacidad de las zonas nodales

Nodo A tipo CCT

- Reacción en el apoyo

$$D/C\ Reac = \frac{R}{F_{nn}\ Reac\ CCT} * 100$$

$$D/C_{Reac} = \frac{1500}{4329.90} * 100$$

$$D/C_{Reac} = 34.643 \%$$

- Tensor

$$D/C_{Ten} = \frac{R}{F_{nn} Ten CCT} * 100$$

$$D/C_{Ten} = \frac{1349.990}{1836} * 100$$

$$D/C_{Ten} = 73.529 \%$$

- Puntal de botella

$$D/C_{Pun} = \frac{R}{F_{nn} Pun CCT} * 100$$

$$D/C_{Pun} = \frac{2018.037}{5324.40} * 100$$

$$D/C_{Pun} = 37.902 \%$$

Nodo E tipo CCC

- Puntal de botella

$$D/C_{Pun} = \frac{R}{F_{nn} Pun CCC} * 100$$

$$D/C_{Pun} = \frac{2018.037}{6655.50} * 100$$

$$D/C_{Pun} = 30.321 \%$$

- Puntal prismático

$$D/C_{Carga} = \frac{R}{F_{nn} PPris CCC} * 100$$

$$D/C_{Carga} = \frac{1349.990}{1912.50} * 100$$

$$D/C_{Carga} = 70.588 \%$$

- Acción de la carga

$$D/C PPris = \frac{R}{F_{nn} Carga CCC} * 100$$

$$D/C PPris = \frac{1500}{6368.625} * 100$$

$$D/C PPris = 23.553 \%$$

4.1.1.10. Acero de refuerzo para tensores

- Refuerzo para $Tm1$ y $Tm3$

$$F_{nt} = \varphi A_{ts} f_y$$

$$A_{ts} = \frac{F_{nt}}{\varphi f_y}$$

$$A_{ts} = \frac{1349.99}{0.75 * (420 * 1000)} = 0.00429 m^2 = 42.9 cm^2$$

De lo cual deducimos que se requiere 11 barras # 7 que serán dispuestas en el diámetro del pilote.

- Refuerzo para $Tm2$ y $Tm4$

$$F_{nt} = \varphi A_{ts} f_y$$

$$A_{ts} = \frac{F_{nt}}{\varphi f_y}$$

$$A_{ts} = \frac{1343.748}{0.75 * (420 * 1000)} = 0.00427 m^2 = 42.7 cm^2$$

De lo cual deducimos que se requiere 11 barras # 7 que serán dispuestas en el diámetro del pilote.

4.1.1.11. Diseño del cabezal de concreto reforzado con “PCD”

Utilizando el software PCD se tomará como ejemplo el caso de estudio resuelto anteriormente.

4.1.1.11.1. Creación de nuevo proyecto

Una vez iniciado el programa PCD, tenemos la ventana principal donde el primer paso a realizar es crear un nuevo proyecto, para eso presionamos el botón “Archivo” y luego en “Nuevo proyecto”.

4.1.1.11.2. Descripción general del proyecto

Automáticamente se debe ingresar la descripción del proyecto, como el nombre del diseñador, fecha y comentarios sobre el diseño, los cuales se guardan al presionar “Aceptar”.

4.1.1.11.3. Definir el tipo de cabezal

Después de agregar la descripción del proyecto, se elige el número de pilotes que tendrá el cabezal guardándose al presionar en el botón “Aceptar”. Ver Figura 4.10.

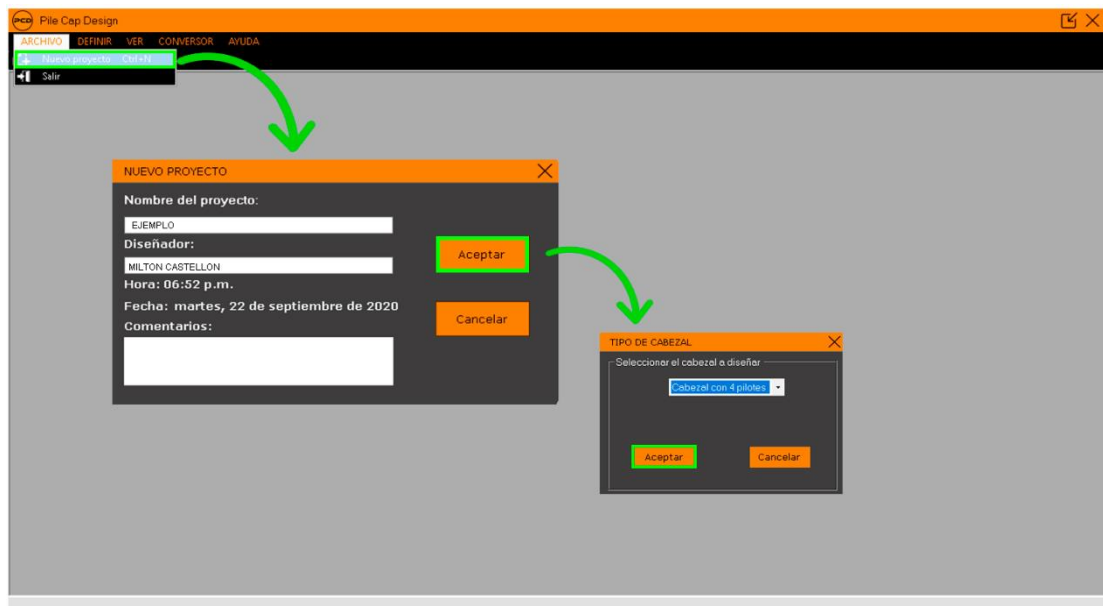


Figura 4.10. Proceso inicial para ingreso de datos.

4.1.1.11.4. Dimensionamiento del cabezal

Se ingresan las dimensiones del elemento guardándose al presionar en el botón “Aceptar”. Ver Figura 4.11.

DATOS DEL ELEMENTO

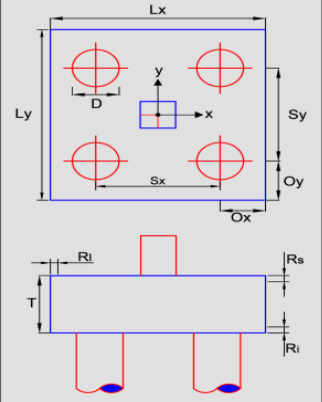
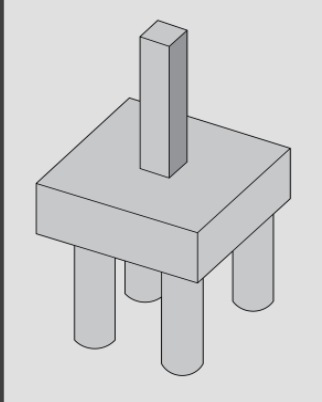


Diagrama de la geometría del cabezal con dimensiones: Lx, Ly, Dx, Sy, Sx, Oy, Ox, Ri, Rs, T, Ri.

Dimensiones del cabezal

Longitud total, Lx (m)	4.2
Ancho total, Ly (m)	3.6
Proyección, Ox (m)	0.6
Proyección, Oy (m)	0.6
Espaciamento de los pilotes, Sx (m)	3
Espaciamento de los pilotes, Sy (m)	2.4
Espesor, T (m)	1.4
Rec. Superior, Rs (m)	0.05
Rec. Inferior, Ri (m)	0.05
Rec. Lateral, Ri (m)	0.05
Diámetro del pilote, D (m)	0.6
Columna	
Dimensión en X (m)	1.5
Dimensión en Y (m)	0.5



Vista 3D del elemento.

Aceptar Cancelar

Figura 4.11. Ventana geometría del cabezal.

Al ingresar las dimensiones se genera un modelo a escala del elemento en el cual tenemos una vista lateral y una vista en 3D. Ver Figura 4.12.

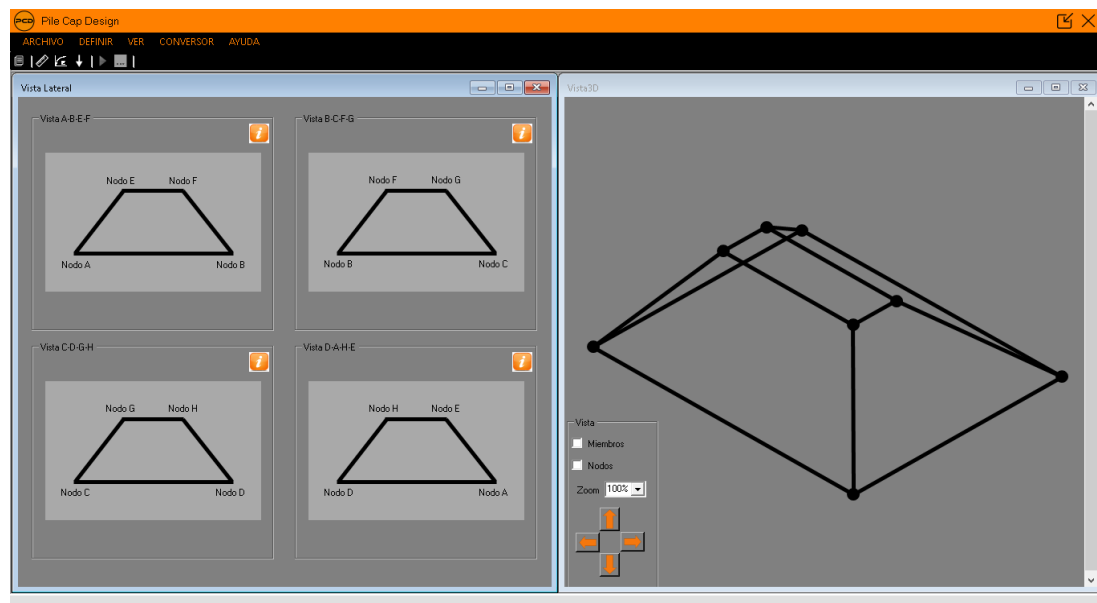


Figura 4.12. Vista lateral y en 3D.

4.1.1.11.5. Definición de materiales

Regresando al menú principal se procede a definir la resistencia de los materiales y el peso volumétrico, este último se asume como cero ya que el peso propio está incluido en la carga muerta, luego se presiona “Aceptar” para guardar los datos. Ver Figura 4.13.

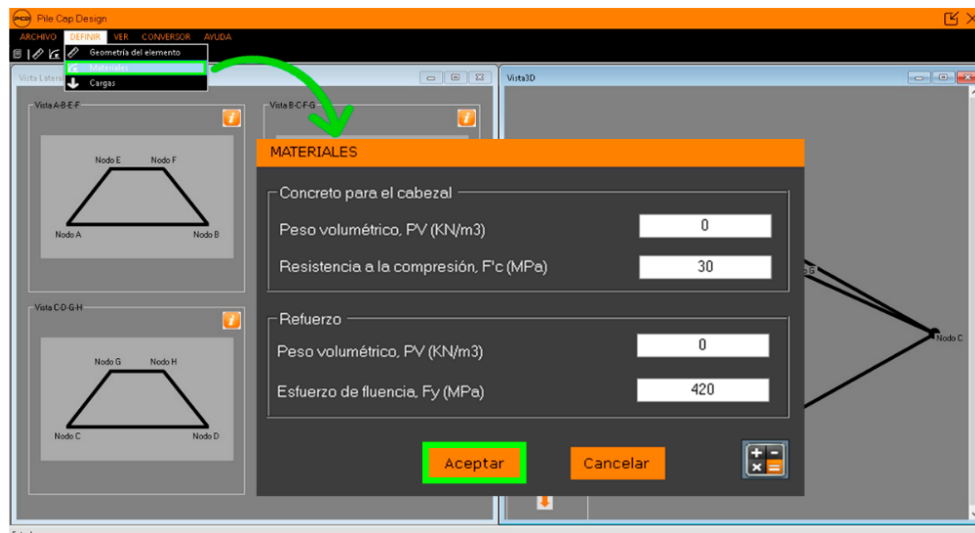


Figura 4.13. Ventana para definición de materiales.

El software PCD está fundamentado específicamente en el ACI 318-19, por lo cual se utilizan las unidades del sistema internacional (SI), el cual considera los valores de fuerza en newton (N), los esfuerzos en pascales (Pa) y las distancias en metros (m). Por ende, PCD establece las longitudes en metros(m), los valores de fuerza en kilonewton (kN) y los esfuerzos en megapascuales (MPa).

4.1.1.11.6. Definición de cargas

La carga muerta y carga viva deben ser idealizadas como cargas puntuales para su ubicación se presiona “Ubicación” en esta parte se debe ubicar la carga con respecto al borde de la columna y la ubicación de las resultantes de tensión y compresión, guardándose al presionar en el botón “Aceptar”, luego se presiona “Aceptar” para guardar los valores de las cargas. Ver Figura 4.14.

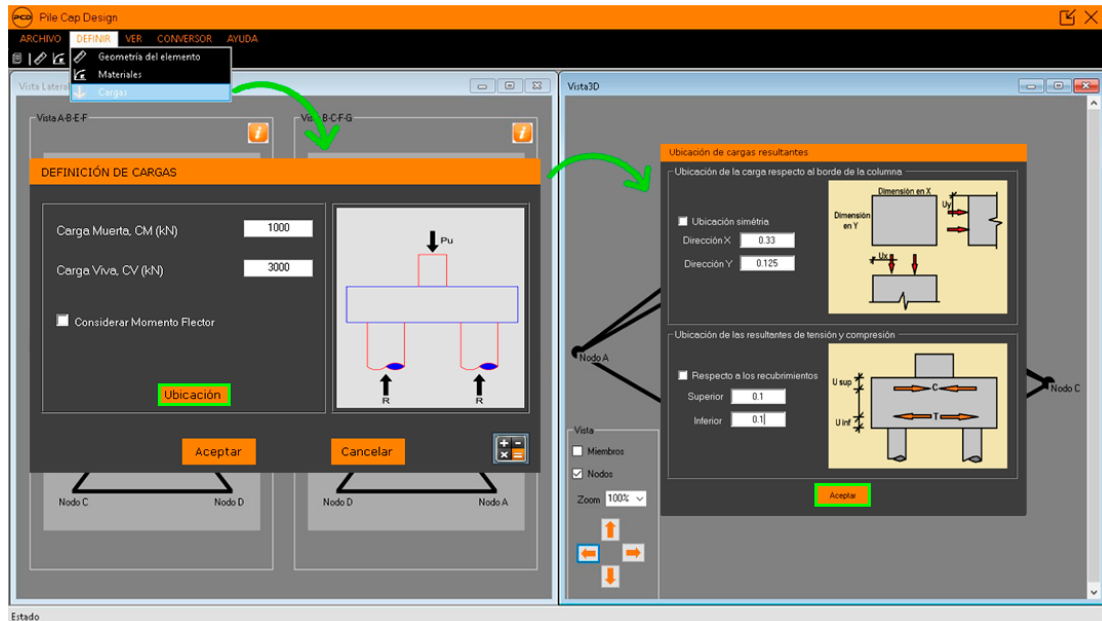


Figura 4.14. Ventana de definición de cargas y ubicación de ellas mismas.

4.1.1.11.7. Análisis del modelo

Habiendo revisado los datos ingresados previamente, se presiona el botón “Correr Análisis” para dar inicio al proceso de análisis. Ver Figura 4.15.

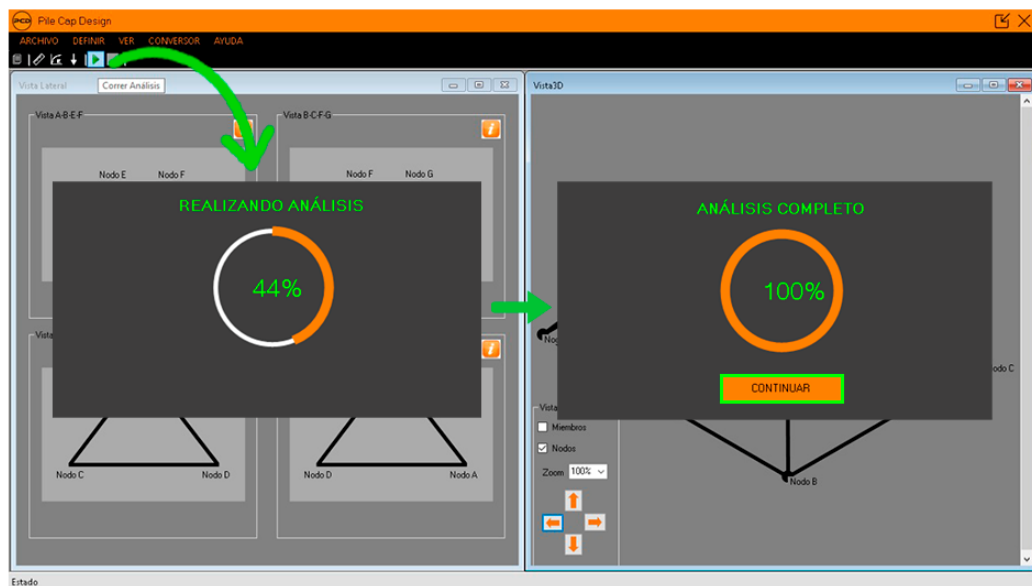


Figura 4.15. Análisis.

4.1.1.11.8. Fuerzas en cada miembro

Habilitamos el checkbox "Miembros" para poder apreciar los valores de las fuerzas en cada elemento. Ver Figura 4.16.

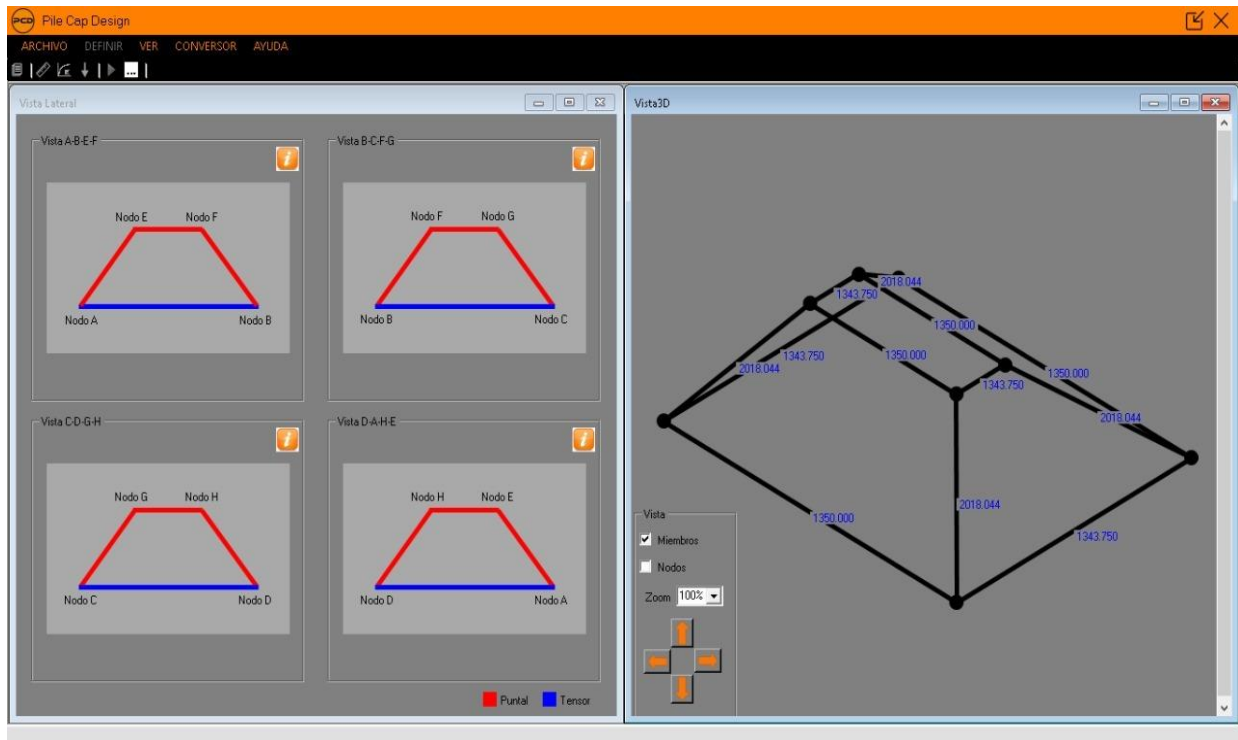


Figura 4.16. Fuerza en cada barra.

4.1.1.11.9. Verificación de puntales

Se puede visualizar la verificación de puntales con respecto a las cargas actuantes mediante una escala de colores la cual nos indica el rango en que se encuentra cada puntal según su color. Ver Figura 4.17.

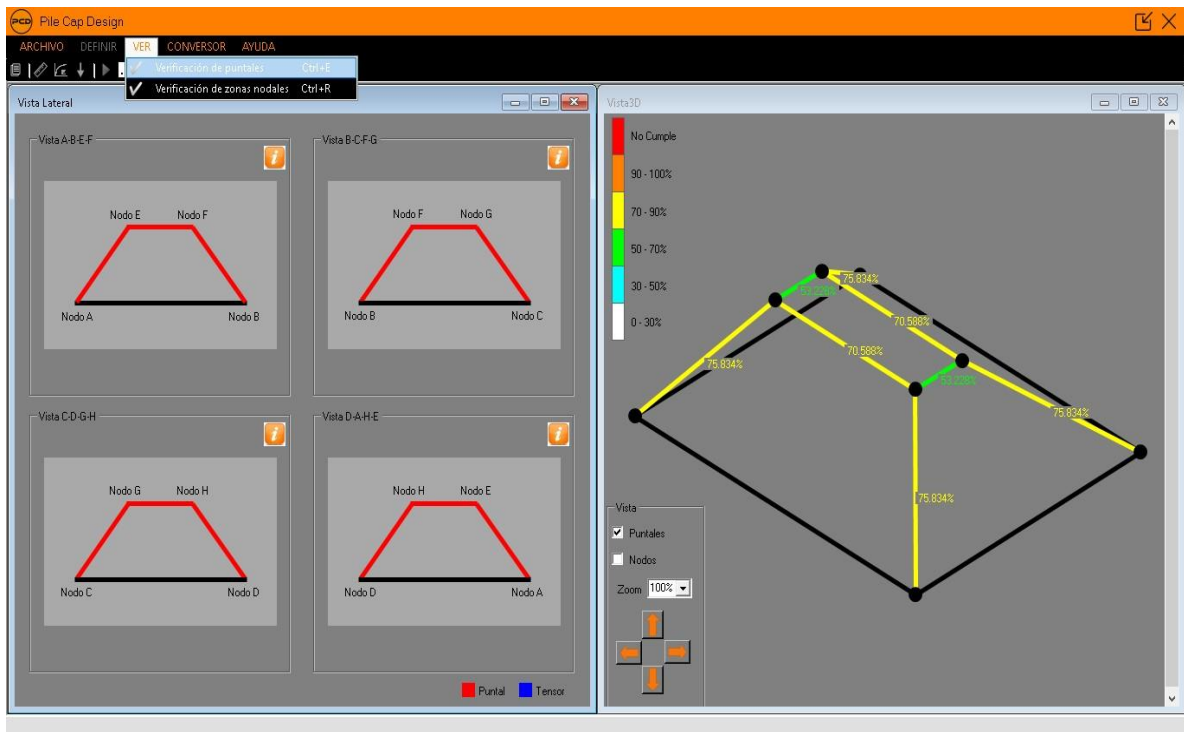


Figura 4.17. Valores de demanda capacidad para cada puntal.

4.1.1.11.10. Verificación de zona nodal

Se visualiza la verificación de zona nodal para obtener más detalles, se presiona el botón “Verificación” donde se despliega una ventana que permite elegir tanto el nodo como la acción que se desea realizar. Ver Figura 4.18.

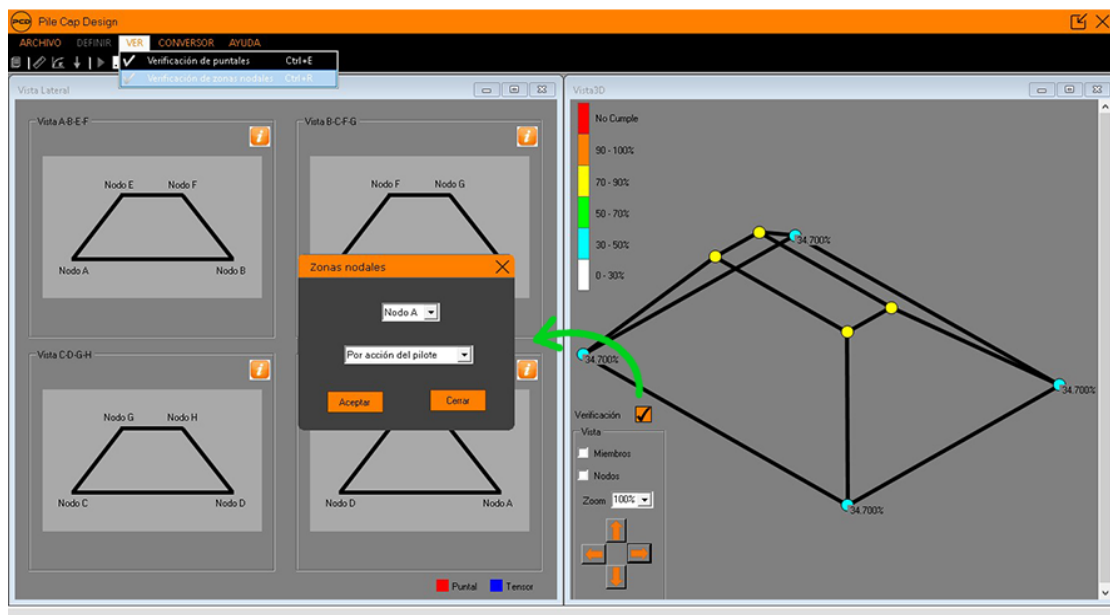


Figura 4.18. Valores de demanda capacidad para la zona nodal.

4.1.1.11.11. Diseño del refuerzo

Al finalizar el análisis, se realiza el cálculo del refuerzo necesario para los tensores. El software PCD habilita el proceso de diseño siempre y cuando que los elementos cumplan con la verificación, en caso contrario el diseño no podrá realizarse hasta asegurarse que los elementos cumplan con las respectivas verificaciones. Es importante mencionar que el software PCD, contiene los factores de reducción de resistencia, entre otros criterios basados al código ACI 318-19, no obstante, al publicarse una nueva versión de este código, el software deberá actualizarse.

4.1.1.11.12. Refuerzo para tensor

En el cálculo del refuerzo para los tensores, permite la opción de elegir la barra a utilizar que posteriormente PCD detalla la cantidad de barras considerando únicamente un tipo de barra para el acero de tensión, si el usuario requiere detalles con diferentes tipos de barra, deberá calcular manualmente la cantidad de barras utilizando el área de acero calculada por el software. Ver Figura 4.19.

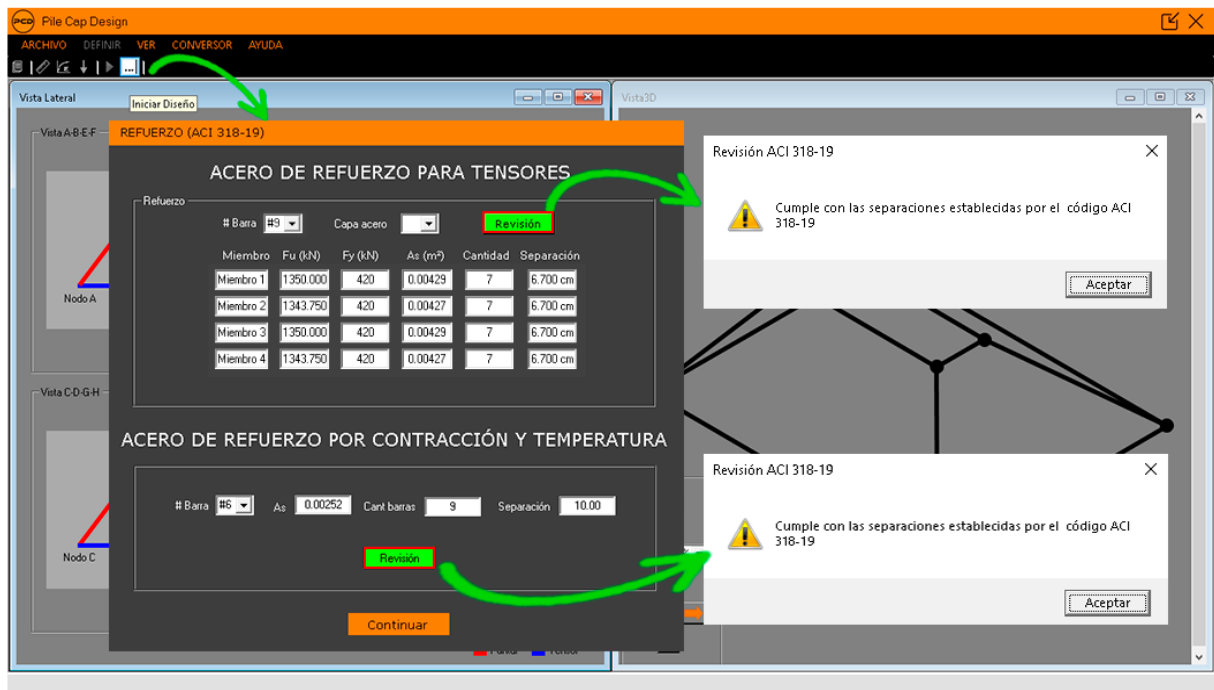


Figura 4.19. Diseño del acero para tensores.

4.1.1.12. Comparación de resultados

4.1.1.12.1. Fuerza en los miembros del modelo

Tabla 4.6

Comparación de valores de fuerza en los miembros obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Miembros	“PCD” (kN)	Manual (kN)
M1	1350	1349.990
M2	1343.75	1343.748
M3	1350	1349.990
M4	1343.75	1343.748
M5	2018.044	2018.037
M6	1350	1349.990
M7	1343.75	1343.748
M8	1350	1349.990
M9	1343.75	1343.748
M10	2018.044	2018.037
M11	2018.044	2018.037
M12	2018.044	2018.037

4.1.1.12.2. Demanda – Capacidad de los puntales

Tabla 4.7

Comparación de los porcentajes de D/C de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Miembros	“PCD” (%)	Manual (%)
M5	75.834	75.803
M6	70.588	70.588
M7	53.228	53.228
M8	70.588	70.588
M9	53.228	53.228
M10	75.834	75.803
M11	75.834	75.803
M12	75.834	75.803

4.1.1.12.3. Zonas nodales

Tabla 4.8

Comparación de los porcentajes de las zonas nodales de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Nodos	Acción	“PCD” (%)	Manual (%)
A	Pilote	34.70	34.643
	Puntal de botella	37.90	37.902
	Tensor	73.50	73.529
B	Pilote	34.70	34.643
	Puntal de botella	37.90	37.902
	Tensor	73.50	73.529
C	Pilote	34.70	34.643
	Puntal de botella	37.90	37.902
	Tensor	73.50	73.529
D	Pilote	34.70	34.643
	Puntal de botella	37.90	37.902
	Tensor	73.50	73.529
E	Puntal de botella	30.30	30.321
	Puntal prismático	70.60	70.588
	Reacción	23.80	23.553
F	Puntal de botella	30.30	30.321
	Puntal prismático	70.60	70.588
	Reacción	23.80	23.553
G	Puntal de botella	30.30	30.321
	Puntal prismático	70.60	70.588
	Reacción	23.80	23.553
H	Puntal de botella	30.30	30.321
	Puntal prismático	70.60	70.588
	Reacción	23.80	23.553

4.1.1.12.4. Acero de refuerzo para tensores

Tabla 4.9

Comparación de las áreas de acero obtenidas en “PCD” y de forma manual.

Tensores	“PCD” (m^2)	Manual (m^2)
T1	0.00429	0.00429
T2	0.00427	0.00427
T3	0.00429	0.00429
T4	0.00427	0.00427

Luego de realizar la comparación de los resultados obtenidos en el software y obtenidos de forma manual, se puede estimar que la confiabilidad de los mismos es alta debido a que no existe una gran variación de estos y en su mayoría son iguales los valores como se aprecia en las tablas anteriores.

4.1.2. Ejemplo de diseño para un cabezal de 4 pilotes sometido a carga axial y momento.

4.1.2.1. Descripción del proyecto

Un cabezal con un espesor de 1.4 m, se apoya en cuatro pilotes de 0.6 m de diámetro cada uno y soporta una columna de 1.5 × 0.5 m como se muestra en la figura 4.20. Usando el método Puntal - Tensor 2D calcule el refuerzo y compruebe los nodos y puntales en el cabezal de pilotes.

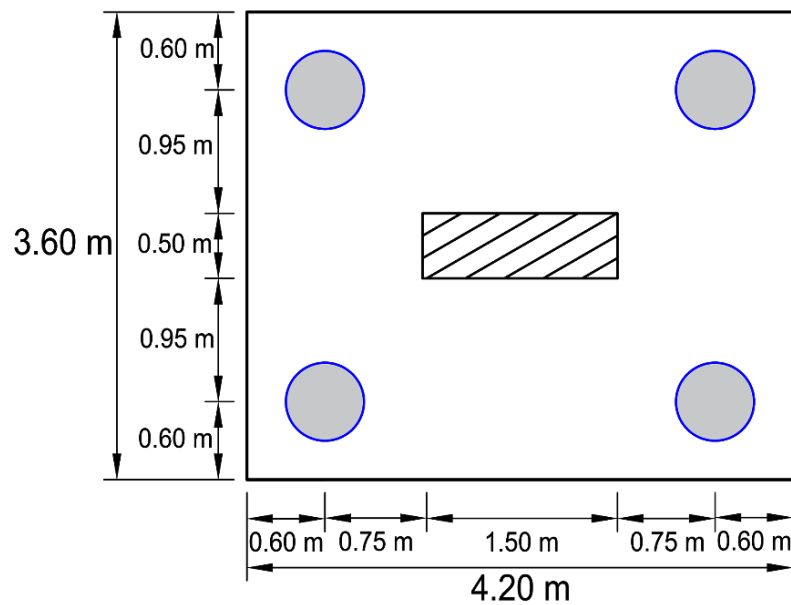


Figura 4.20. Dimensiones del cabezal.

Las propiedades principales de los materiales a utilizar se muestran a continuación:

Tabla 4.10

Datos de materiales.

Materiales	Valor
Concreto	$f_c' = 30 \text{ MPa}$
Acero	$f_y = 420 \text{ MPa}$

El cabezal estará sujeto a las siguientes solicitaciones:

Tabla 4.11

Solicitaciones actuantes.

Cargas	Valor
Peso propio	Considerado dentro del valor de la carga muerta
Carga muerta	1000 kN
Carga viva	937.5 kN
Momento	4950 kN.m

4.1.2.2. Selección del modelo puntal tensor compatible con el flujo de esfuerzos

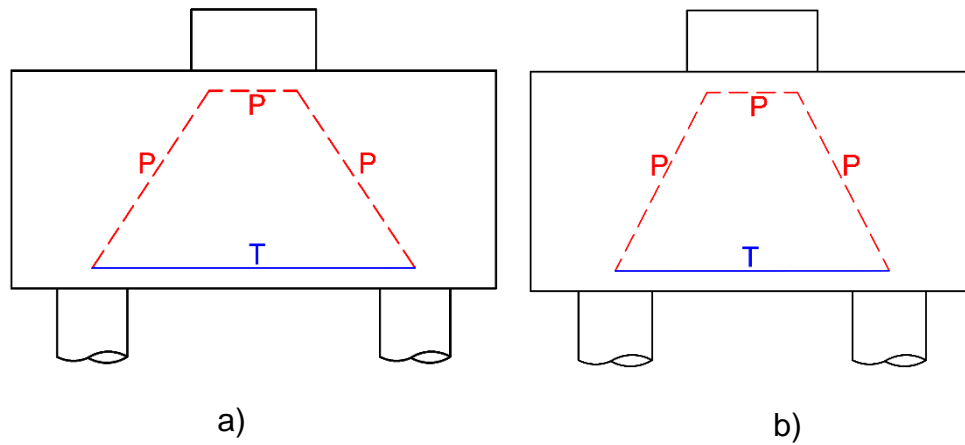


Figura 4.21. Modelo puntal – tensor para el ejemplo de diseño, a) vista del eje X, b) vista del eje Y.

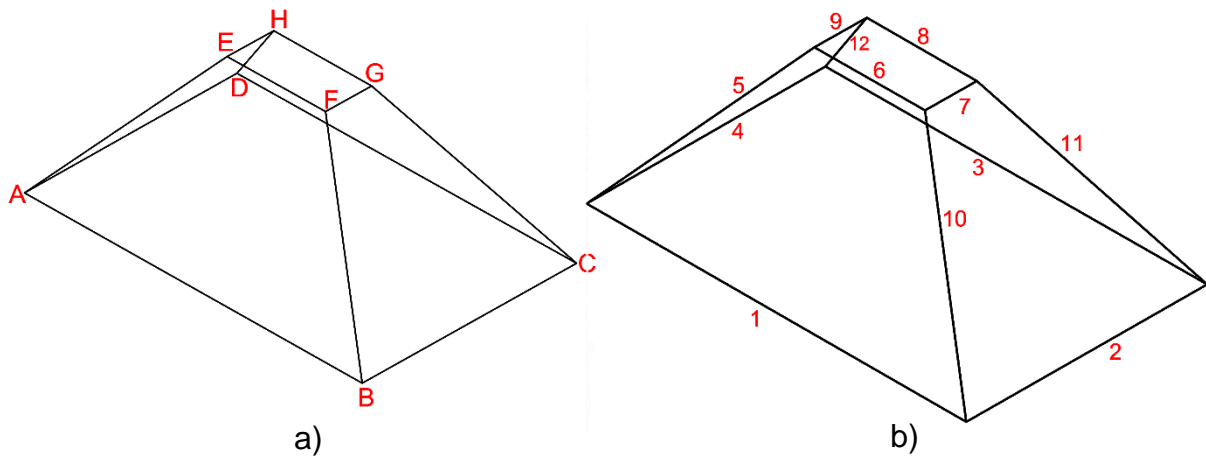


Figura 4.22. Modelo puntal – tensor, a) nodos, b) miembros.

4.1.2.3. Cálculo del ángulo entre el eje del puntal y el eje del tensor en dirección X

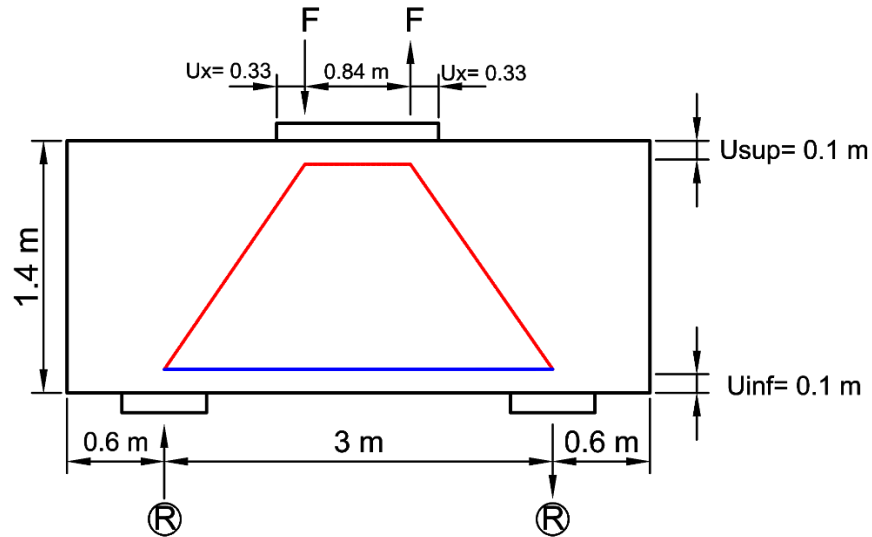


Figura 4.23. Transferencia de fuerza en dirección X.

$$Cax = \left(\frac{\text{Espaciamiento entre los pilotes } x}{2} \right) - \left(\frac{\text{Dim. de la columna en X}}{2} \right) + UX$$

$$Cax = \left(\frac{3m}{2} \right) - \left(\frac{1.5m}{2} \right) + 0.33 = 1.080m$$

$$Cox = \text{Espesor del cabezal} - U_{sup} - U_{inf}$$

$$Cox = 1.4m - 0.1m - 0.1m = 1.2m$$

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{1.2m}{1.080m} \right) = 48.013^\circ$$

4.1.2.4. Cálculo del ángulo entre el eje del puntal y el eje del tensor en dirección Y

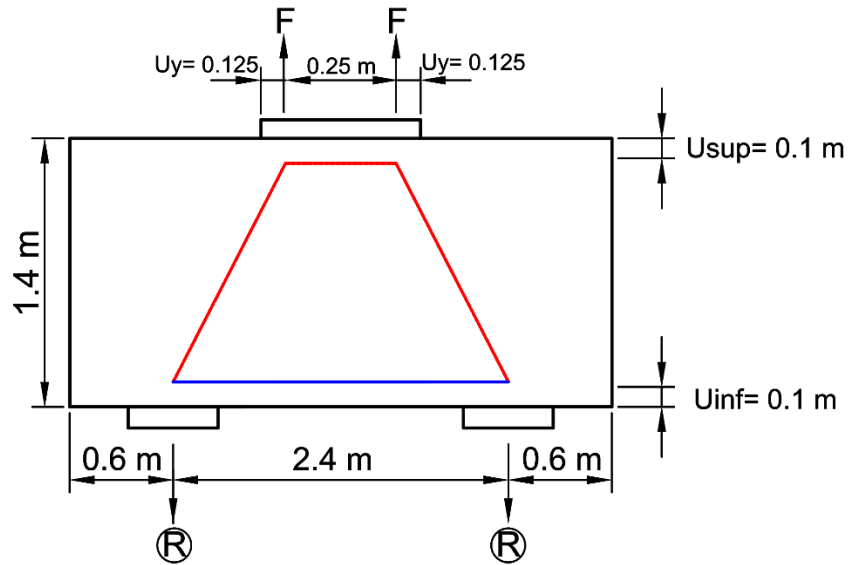


Figura 4.24. Transferencia de fuerza en dirección Y.

$$C_{ay} = \left(\frac{\text{Espaciamiento entre los pilotes } y}{2} \right) - \left(\frac{\text{Dim. de la columna en } y}{2} \right) + U_y$$

$$C_{ay} = \left(\frac{2.4m}{2} \right) - \left(\frac{0.5m}{2} \right) + 0.125 = 1.075m$$

$$C_{oy} = \text{Espesor del cabezal} - U_{sup} - U_{inf}$$

$$C_{oy} = 1.4m - 0.1m - 0.1m = 1.2m$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{1.2m}{1.075} \right) = 48.145^\circ$$

4.1.2.5. Reacciones

$$Nu = 1.2CM + 1.6CV$$

$$Nu = 1.2(1000) + 1.6(937.5) = 2700 \text{ kN}$$

$$c = \text{Dim. de la col en } x - 2 * U_x$$

$$c = 1.5 - 2 * 0.33 = 0.84 \text{ m}^2$$

$$f = \left(\frac{Mu}{c} \right)$$

$$f = \left(\frac{4950}{0.84} \right) = 5892.857 \text{ kN/m}$$

$$R_2 = \left(\frac{\left(\frac{Nu}{4} - f \right) \left(\frac{\text{Espa entre los pilot } x}{2} + \frac{c}{2} \right) + \left(\frac{Nu}{4} + f \right) \left(\frac{\text{Espa entre los pilot } x}{2} - \frac{c}{2} \right)}{\text{Espa entre los pilot } x} \right)$$

$$R_2 = \left(\frac{\left(\frac{2700}{4} - 5892.857 \right) \left(\frac{3}{2} + \frac{0.84}{2} \right) + \left(\frac{2700}{4} + 5892.857 \right) \left(\frac{3}{2} - \frac{0.84}{2} \right)}{3} \right)$$

$$R_2 = -975 \text{ kN}$$

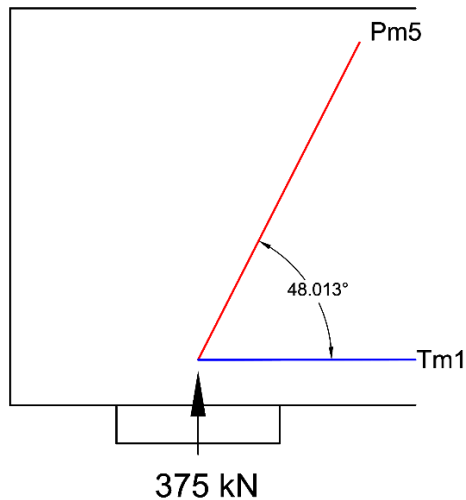
$$R_1 = \left(f + \frac{Nu}{4} \right) + \left(\frac{Nu}{4} - f \right) + R_2$$

$$R_1 = \left(5892.857 + \frac{2700}{4} \right) + \left(\frac{2700}{4} - 5892.857 \right) + (-975)$$

$$R_1 = 375 \text{ kN}$$

4.1.2.6. Cálculo de fuerzas en puntales y tensores en dirección X

Equilibrio del nodo A



$$\sum F_y \uparrow + = 0$$

$$375 - P_{m5} \sin(48.013^\circ) = 0$$

$$P_{m5} = \left(\frac{375}{\sin 48.013^\circ} \right)$$

$$P_{m5} = 504.509 \text{ kN}$$

$$\sum F_x \rightarrow + = 0$$

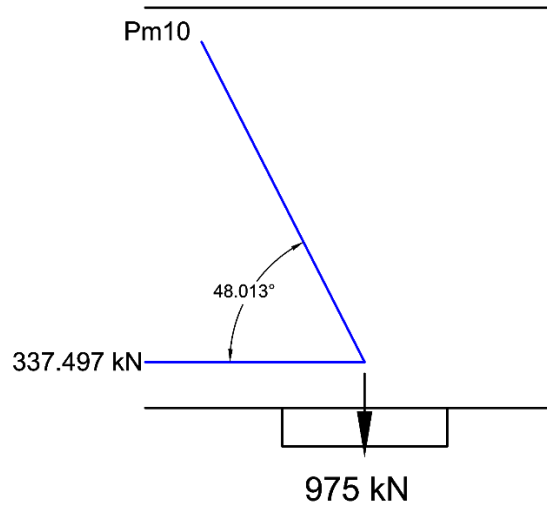
$$T_{m1} - 504.509 \cos(48.013^\circ) = 0$$

$$T_{m1} = 504.509 \cos(48.013^\circ)$$

$$T_{m1} = 337.497 \text{ kN}$$

Figura 4.25. Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo A.

Equilibrio del nodo B



$$\sum F_y \uparrow + = 0$$

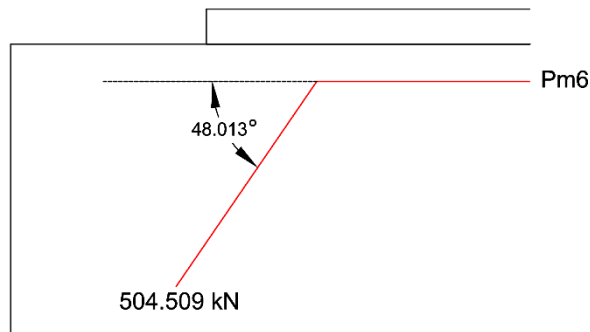
$$-975 + T_{m10} \sin(48.013)$$

$$T_{m10} = \frac{975}{\sin(48.013)}$$

$$T_{m10} = 1311.724 \text{ kN}$$

Figura 4.26. Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo B.

Equilibrio del nodo E



$$\sum F_x \rightarrow + = 0$$

$$-P_{m6} + 504.509 \cos(48.013^\circ) = 0$$

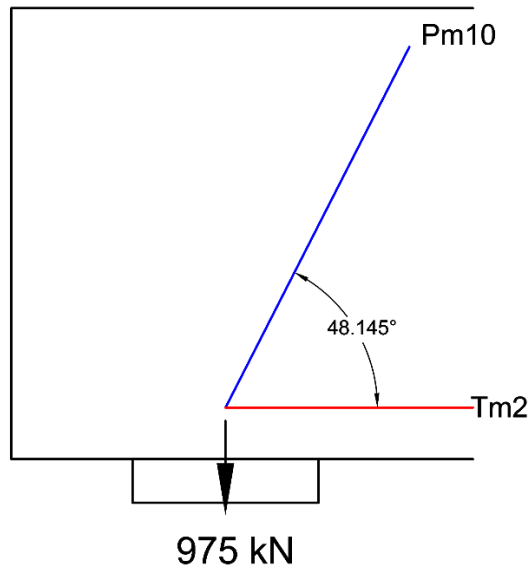
$$P_{m6} = 504.509 \cos(48.013^\circ)$$

$$P_{m6} = 337.497 \text{ kN}$$

Figura 4.27. Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo E.

4.1.2.7. Cálculo de fuerzas en puntales y tensores en dirección Y

Equilibrio del nodo B



$$\sum F_y \uparrow + = 0$$

$$-975 + T_{m10} \sin(48.145^\circ) = 0$$

$$T_{m10} = \left(\frac{975}{\sin 48.145^\circ} \right)$$

$$T_{m10} = 1309.013 \text{ kN}$$

$$\sum F_x \rightarrow + = 0$$

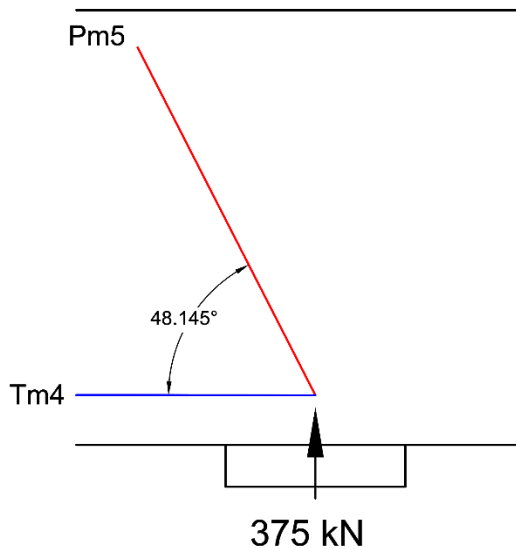
$$1309.013 \cos(48.145^\circ) - P_{m2} = 0$$

$$P_{m2} = 1309.013 \cos(48.145^\circ)$$

Figura 4.28. Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo B.

$$P_{m2} = 873.436 \text{ kN}$$

Equilibrio del nodo A



$$\sum F_y \uparrow + = 0$$

$$375 - P_{m5} \sin(48.145^\circ) = 0$$

$$P_{m5} = \left(\frac{375}{\sin 48.145^\circ} \right)$$

$$P_{m5} = 503.467 \text{ kN}$$

$$\sum F_x \rightarrow + = 0$$

$$503.467 \cos(48.145^\circ) - T_{m4} = 0$$

$$T_{m4} = 503.467 \cos(48.145^\circ)$$

$$T_{m4} = 335.937 \text{ kN}$$

Figura 4.29. Diagrama de cuerpo libre de esfuerzos, Nodo A.

Resultados del cálculo de fuerzas en los puntales y tensores para el eje X y eje Y.

Tabla 4.12

Fuerzas en puntales y tensores en el eje X.

<i>Miembros</i>	<i>Fu (kN)</i>
Tm1	337.497
Tm3	337.497
Pm5	504.509
Tm10	1311.724
Tm11	1311.724
Pm12	504.509
Pm6	337.497
Pm8	337.497

Tabla 4.13

Fuerzas en puntales y tensores en el eje Y.

<i>Miembros</i>	<i>Fu (kN)</i>
Pm2	873.436
Tm4	335.937
Pm5	503.467
Tm10	1309.013
Tm11	1309.013
Pm12	503.467
Pm7	873.436
Pm9	335.937

4.1.2.8. Verificación de esfuerzos en los puntales

Tabla 4.14

Resistencia efectiva de los puntales.

Puntal	Tipo	$0.85f'_c$	β_c	β_s	ϕ	ϕf_{cu}
P_{m5}	Botella	25,500 KPa	1.00	0.4	0.75	7,650 KPa
P_{m2}	Prismático	25,500 KPa	1.00	1.00	0.75	19,125 KPa
P_{m6}	Prismático	25,500 KPa	1.00	1.00	0.75	19,125 KPa
P_{m9}	Prismático	25,500 KPa	1.00	1.00	0.75	19,125 KPa

4.1.2.8.1. Área nominal de cada puntal

- Puntal de botella P_{m5}

$$wsx = (2 * U_{inf}) \cos \theta x + (D. \text{pilote}) \sin \theta x$$

$$wsx = (2 * 0.1) \cos 48.0128^\circ + (0.6) \sin 48.0128^\circ$$

$$wsx = 0.58m$$

$$AP_{m5} = wsx * D. \text{pilote}$$

$$AP_{m5} = 0.58 * 0.6$$

$$AP_{m5} = 0.348m^2$$

- Puntal prismático P_{m2}

$$AP_{m2} = (2 * Ux) * (2 * U_{inf})$$

$$AP_{m2} = (2 * 0.1) * (2 * 0.1) = 0.132 m^2$$

- Puntal prismático P_{m6}

$$AP_{m6} = (Uy * 4) * (U_{sup} * 2)$$

$$AP_{m6} = (0.125 * 4) * (0.1 * 2)$$

$$AP_{m6} = 0.1 m^2$$

- Puntal prismático P_{m9}

$$AP_{m9} = (Ux * 2) * (U_{sup} * 2)$$

$$AP_{m9} = (0.33 * 2) * (0.1 * 2)$$

$$AP_{m9} = 0.132 m^2$$

4.1.2.8.2. Resistencia nominal a la compresión de los puntales

- Puntal de botella P_{m5}

$$f_{ns}P_{m5} = \varphi f_{ce}A_{cs}$$

$$f_{ns}P_{m5} = 7650 \text{ KPa} * 0.348 \text{ m}^2$$

$$f_{ns}P_{m5} = 2662.20 \text{ kN} > 504.509 \text{ kN} \therefore Ok!$$

- Puntal prismático P_{m2}

$$f_{ns}P_{m2} = \varphi f_{ce}A_{cs}$$

$$f_{ns}P_{m2} = 19125 \text{ KPa} * 0.132 \text{ m}^2$$

$$f_{ns}P_{m2} = 2524.50 \text{ kN} > 873.436 \text{ kN} \therefore Ok!$$

- Puntal prismático P_{m6}

$$f_{ns}P_{m6} = \varphi f_{ce}A_{cs}$$

$$f_{ns}P_{m6} = 19125 \text{ KPa} * 0.1 \text{ m}^2$$

$$f_{ns}P_{m6} = 1912.50 \text{ kN} > 337.497 \text{ kN} \therefore Ok!$$

- Puntal prismático P_{m9}

$$f_{ns}P_{m9} = \varphi f_{ce}A_{cs}$$

$$f_{ns}P_{m9} = 19125 \text{ KPa} * 0.132 \text{ m}^2$$

$$f_{ns}P_{m9} = 2524.50 \text{ kN} > 335.937 \text{ kN} \therefore Ok!$$

4.1.2.8.3. Demanda – capacidad de los puntales

- Puntal de botella P_{m5}

$$D/CP_{m5} = \frac{f_u}{f_{ns}P_{m5}} * 100$$

$$D/CP_{m5} = \frac{504.509}{2662.20} * 100$$

$$D/CP_{m5} = 18.951 \%$$

- Puntal prismático P_{m2}

$$D/CP_{m2} = \frac{f_u}{f_{ns}P_{m2}} * 100$$

$$D/CP_{m2} = \frac{873.436}{2524.5} * 100$$

$$D/CP_{m2} = 34.598 \%$$

- Puntal prismático P_{m6}

$$D/CP_{m6} = \frac{f_u}{f_{ns}P_{m6}} * 100$$

$$D/CP_{m6} = \frac{337.497}{1912.50} * 100$$

$$D/CP_{m6} = 17.647 \%$$

- Puntal prismático P_{m9}

$$D/CP_{m9} = \frac{f_u}{f_{ns}P_{m9}} * 100$$

$$D/CP_{m9} = \frac{335.937}{2524.50} * 100$$

$$D/CP_{m9} = 13.307 \%$$

4.1.2.9. Verificación de zonas nodales

4.1.2.9.1. Área de las caras de la zona nodal

Nodo A tipo CCT

- Reacción en el apoyo

$$A_{Reac CCT} = \frac{\pi * D.pilote^2}{4}$$

$$A_{Reac CCT} = \frac{\pi * 0.6^2}{4} = 0.283 m^2$$

- Tensor

$$A_{Ten CCT} = (2 * U_{inf}) * D.pilote$$

$$A_{Ten CCT} = (2 * 0.1) * 0.6 = 0.120 m^2$$

- Puntal de botella

$$wsx = (2 * U_{inf}) \cos \theta x + (D.pilote) \sin \theta x$$

$$wsx = (2 * 0.1) \cos 48.0128^\circ + (0.6) \sin 48.0128^\circ$$

$$wsx = 0.58m$$

$$APun CCT = wsx * D.pilote$$

$$APun CCT = 0.58 * 0.6 = 0.348 m^2$$

Nodo E tipo CCC

- Puntal de botella

$$wsx = (2 * UInf) \cos \theta x + (D.pilote) \sin \theta x$$

$$wsx = (2 * 0.1) \cos 48.0128^\circ + (0.6) \sin 48.0128^\circ$$

$$wsx = 0.58m$$

$$APun CCC = wsx * D.pilote$$

$$APun CCC = 0.58 * 0.6 = 0.348 m^2$$

- Puntal prismático

$$APPris CCC = (4 * Uy) * (2 * Usup)$$

$$APPris CCC = (4 * 0.125) * (2 * 0.1) = 0.1 m^2$$

- Acción de la carga

$$ACarga CCC = (4 * Uy) * (2.5 * Ux)$$

$$ACarga CCC = (4 * 0.125) * (2.5 * 0.333) = 0.416 m^2$$

Nodo B tipo CTT

- Puntal de botella

$$wsx = (2 * UInf) \cos \theta x + (D.pilote) \sin \theta x$$

$$wsx = (2 * 0.1) \cos 48.0128^\circ + (0.6) \sin 48.0128^\circ$$

$$wsx = 0.58m$$

$$APun CTT = wsx * D.pilote$$

$$APun CTT = 0.58 * 0.6 = 0.348 m^2$$

- Puntal prismático

$$APPris CTT = (4 * Uy) * (2 * Usup)$$

$$APPris CTT = (4 * 0.125) * (2 * 0.1) = 0.1 m^2$$

- Reacción en el apoyo

$$AReac CTT = (4 * Uy) * (2.5 * Ux)$$

$$AReac CTT = (4 * 0.125) * (2.5 * 0.333) = 0.416 m^2$$

4.1.2.9.2. Resistencia nominal de la zona nodal

Nodo A tipo CCT

- Reacción en el apoyo

$$F_{nn} \text{ Reac CCT} = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f c' * A_{\text{Reac CCT}}$$

$$F_{nn} \text{ Reac CCT} = 0.75 * 0.85 * 1 * 0.8 * (30 * 1000) * 0.283 = 4329.90 \text{ kN}$$

- Tensor

$$F_{nn} \text{ Ten CCT} = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f c' * A_{\text{Ten CCT}}$$

$$F_{nn} \text{ Ten CCT} = 0.75 * 0.85 * 1 * 0.8 * (30 * 1000) * 0.120 = 1836 \text{ kN}$$

- Puntal de botella

$$F_{nn} \text{ Pun CCT} = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f c' * A_{\text{Pun CCT}}$$

$$F_{nn} \text{ Pun CCT} = 0.75 * 0.85 * 1 * 0.8 * (30 * 1000) * 0.348 = 5324.40 \text{ kN}$$

Nodo E tipo CCC

- Puntal de botella

$$F_{nn} \text{ Pun CCC} = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f c' * A_{\text{Pun CCC}}$$

$$F_{nn} \text{ Pun CCC} = 0.75 * 0.85 * 1 * 1 * (30 * 1000) * 0.348 = 6655.50 \text{ kN}$$

- Puntal prismático

$$F_{nn} \text{ PPris CCC} = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f c' * A_{\text{PPris CCC}}$$

$$F_{nn} \text{ PPris CCC} = 0.75 * 0.85 * 1 * 1 * (30 * 1000) * 0.1 = 1912.50 \text{ kN}$$

- Acción de la carga

$$F_{nn} \text{ Carga CCC} = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f c' * A_{\text{Carga CCC}}$$

$$F_{nn} \text{ Carga CCC} = 0.75 * 0.85 * 1 * 1 * (30 * 1000) * 0.416 = 7956 \text{ kN}$$

Nodo B tipo CTT

- Puntal de botella

$$F_{nn} \text{ Pun CTT} = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f c' * A_{\text{Pun CTT}}$$

$$F_{nn} \text{ Pun CTT} = 0.75 * 0.85 * 1 * 0.6 * (30 * 1000) * 0.348 = 3993.30 \text{ kN}$$

- Puntal prismático

$$F_{nn} \text{ PPris CTT} = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f c' * A_{\text{PPris CTT}}$$

$$F_{nn} \text{ PPris CTT} = 0.75 * 0.85 * 1 * 0.6 * (30 * 1000) * 0.1 = 1147.50 \text{ kN}$$

- Reacción en el apoyo

$$F_{nn} \text{ Reac } CTT = \phi 0.85 \beta_c \beta_n f_c' * A \text{ Reac } CTT$$

$$F_{nn} \text{ Reac } CTT = 0.75 * 0.85 * 1 * 0.6 * (30 * 1000) * 0.416 = 4773.60 \text{ kN}$$

4.1.2.9.3. Demanda – capacidad de las zonas nodales

Nodo A tipo CCT

- Reacción en el apoyo

$$D/C \text{ Reac} = \frac{R}{F_{nn} \text{ Reac } CCT} * 100$$

$$D/C \text{ Reac} = \frac{375}{4329.90} * 100$$

$$D/C \text{ Reac} = 8.661 \%$$

- Tensor

$$D/C \text{ Ten} = \frac{R}{F_{nn} \text{ Ten } CCT} * 100$$

$$D/C \text{ Ten} = \frac{337.497}{1836} * 100$$

$$D/C \text{ Ten} = 18.382 \%$$

- Puntal de botella

$$D/C \text{ Pun} = \frac{R}{F_{nn} \text{ Pun } CCT} * 100$$

$$D/C \text{ Pun} = \frac{504.509}{5324.40} * 100$$

$$D/C \text{ Pun} = 9.475 \%$$

Nodo E tipo CCC

- Puntal de botella

$$D/C \text{ Pun} = \frac{R}{F_{nn} \text{ Pun } CCC} * 100$$

$$D/C \text{ Pun} = \frac{504.509}{6655.50} * 100$$

$$D/C \text{ Pun} = 7.58 \%$$

- Puntal prismático

$$D/C \text{ Carga} = \frac{R}{F_{nn} \text{ PPris CCC}} * 100$$

$$D/C \text{ Carga} = \frac{337.497}{1912.50} * 100$$

$$D/C \text{ Carga} = 17.647 \%$$

- Acción de la carga

$$D/C \text{ PPris} = \frac{R}{F_{nn} \text{ Carga CCC}} * 100$$

$$D/C \text{ PPris} = \frac{6567.857}{7956} * 100$$

$$D/C \text{ PPris} = 82.552 \%$$

Nodo B tipo CTT

- Reacción en el apoyo

$$D/C \text{ Reac} = \frac{R}{F_{nn} \text{ Reac CTT}} * 100$$

$$D/C \text{ Reac} = \frac{975}{4773.60} * 100$$

$$D/C \text{ Reac} = 20.425 \%$$

- Puntal de botella

$$D/C \text{ Pun} = \frac{R}{F_{nn} \text{ PPris CTT}} * 100$$

$$D/C \text{ Pun} = \frac{873.436}{1147.50} * 100$$

$$D/C \text{ Pun} = 76.116 \%$$

- Tensor

$$D/C \text{ Ten} = \frac{R}{F_{nn} \text{ Pun } CTT} * 100$$

$$D/C \text{ Ten} = \frac{1309.013}{3993.30} * 100$$

$$D/C \text{ Ten} = 32.78 \%$$

4.1.2.10. Acero de refuerzo para tensores

- Refuerzo para $Tm1$ y $Tm3$

$$F_{nt} = \varphi A_{ts} f_y$$

$$A_{ts} = \frac{F_{nt}}{\varphi f_y}$$

$$A_{ts} = \frac{337.497}{0.75 * (420 * 1000)} = 0.001071 \text{ m}^2 = 10.714 \text{ cm}^2$$

De lo cual deducimos que se requiere 3 barras # 7 que serán dispuestas en el diámetro del pilote.

- Refuerzo para $Tm4$

$$F_{nt} = \varphi A_{ts} f_y$$

$$A_{ts} = \frac{F_{nt}}{\varphi f_y}$$

$$A_{ts} = \frac{335.937}{0.75 * (420 * 1000)} = 0.001067 \text{ m}^2 = 10.665 \text{ cm}^2$$

De lo cual deducimos que se requiere 3 barras # 7 que serán dispuestas en el diámetro del pilote.

4.1.2.11. Diseño del cabezal de concreto reforzado con “PCD”

4.1.2.11.1. Ingreso de datos generales

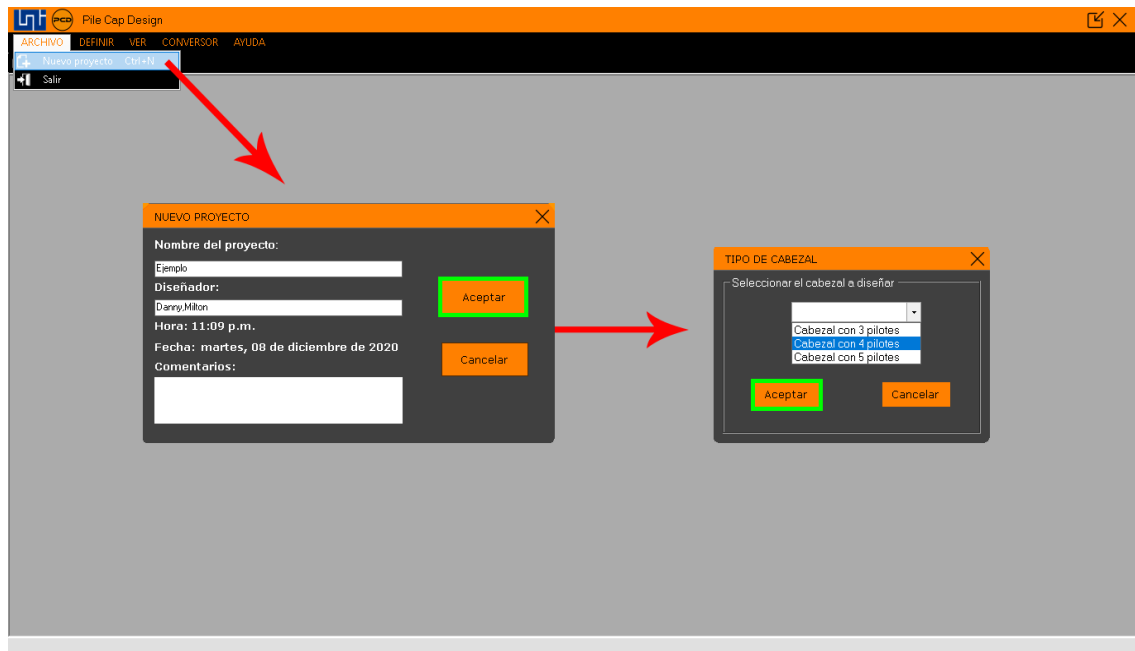


Figura 4.30. Proceso inicial para ingreso de datos.

4.1.2.11.2. Dimensionamiento del cabezal

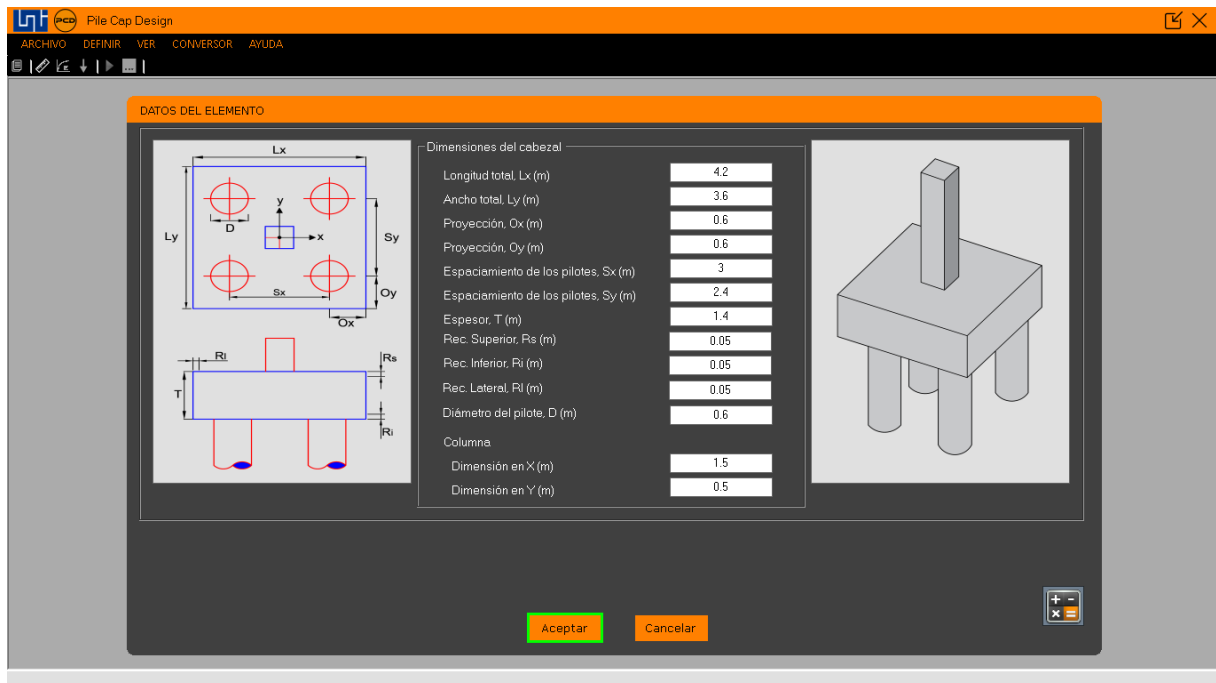


Figura 4.31. Ventana geometría del cabezal.

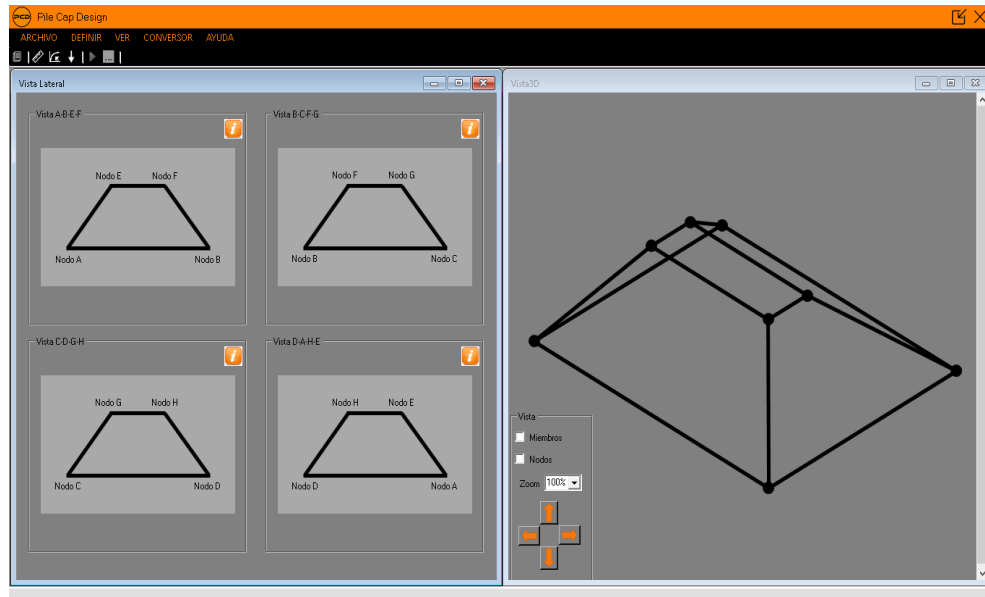


Figura 4.32. Vista lateral y en 3D.

4.1.2.11.3. Definición de materiales

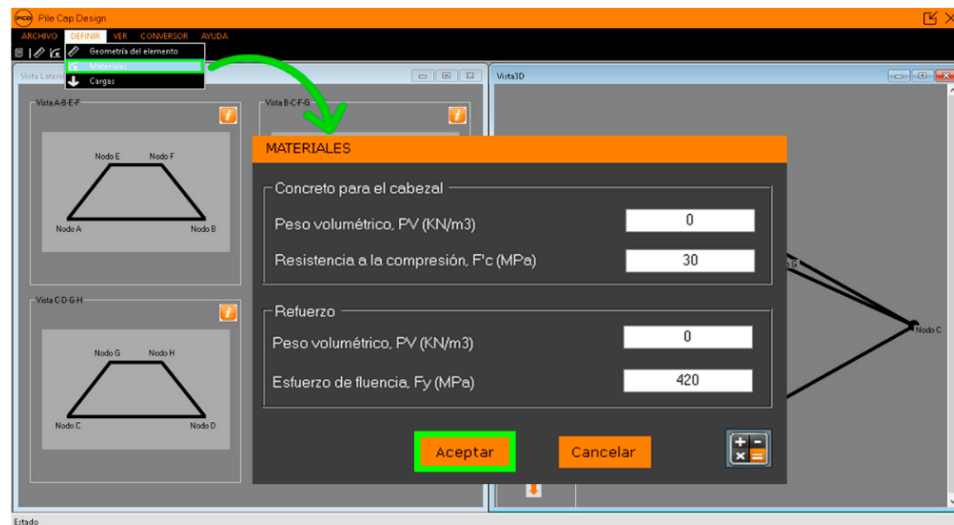


Figura 4.33. Ventana para definición de materiales.

4.1.2.11.4. Definición de cargas

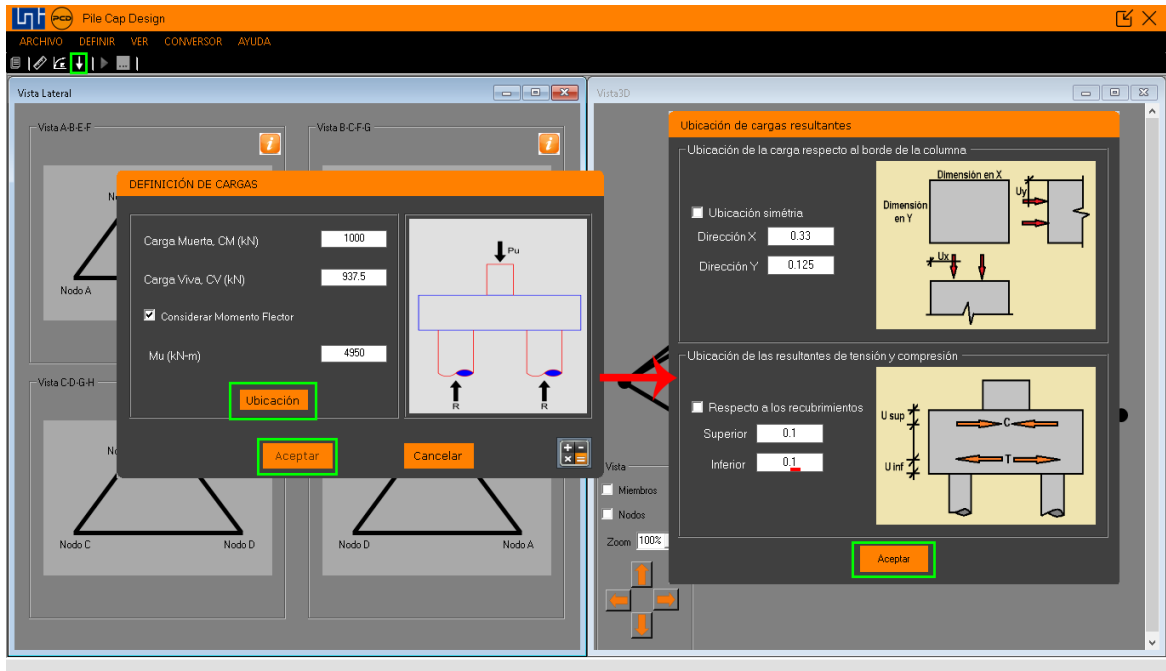


Figura 4.34. Ventana de definición de cargas y ubicación de ellas mismas.

4.1.2.11.5. Análisis del modelo

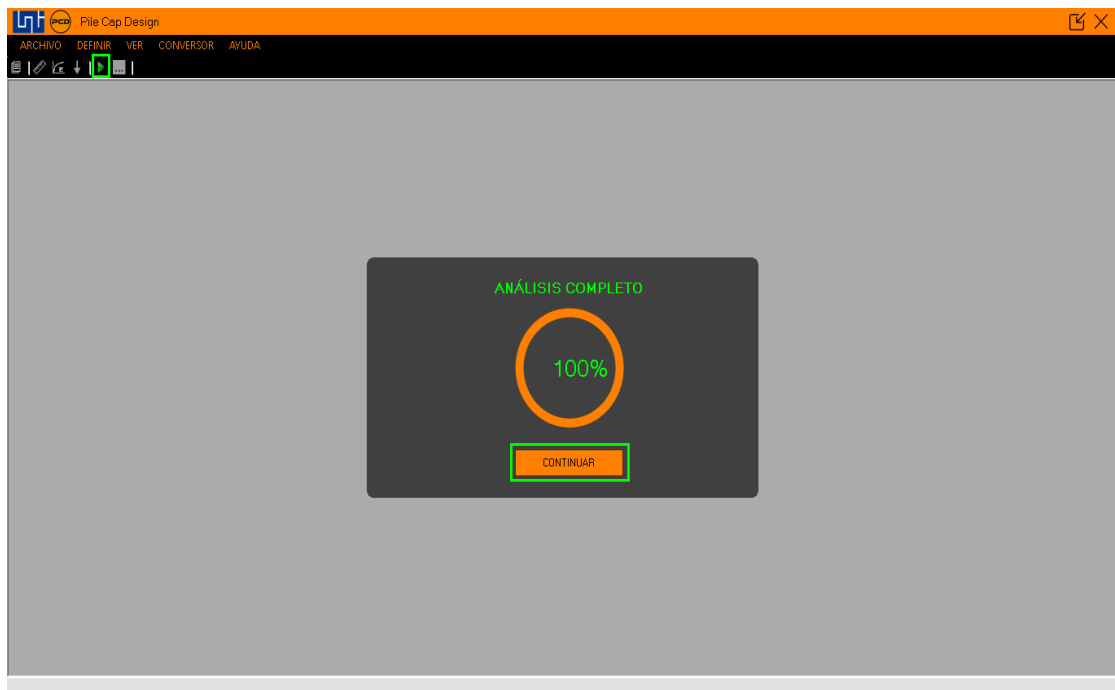


Figura 4.35. Análisis.

4.1.2.11.6. Fuerzas en cada miembro

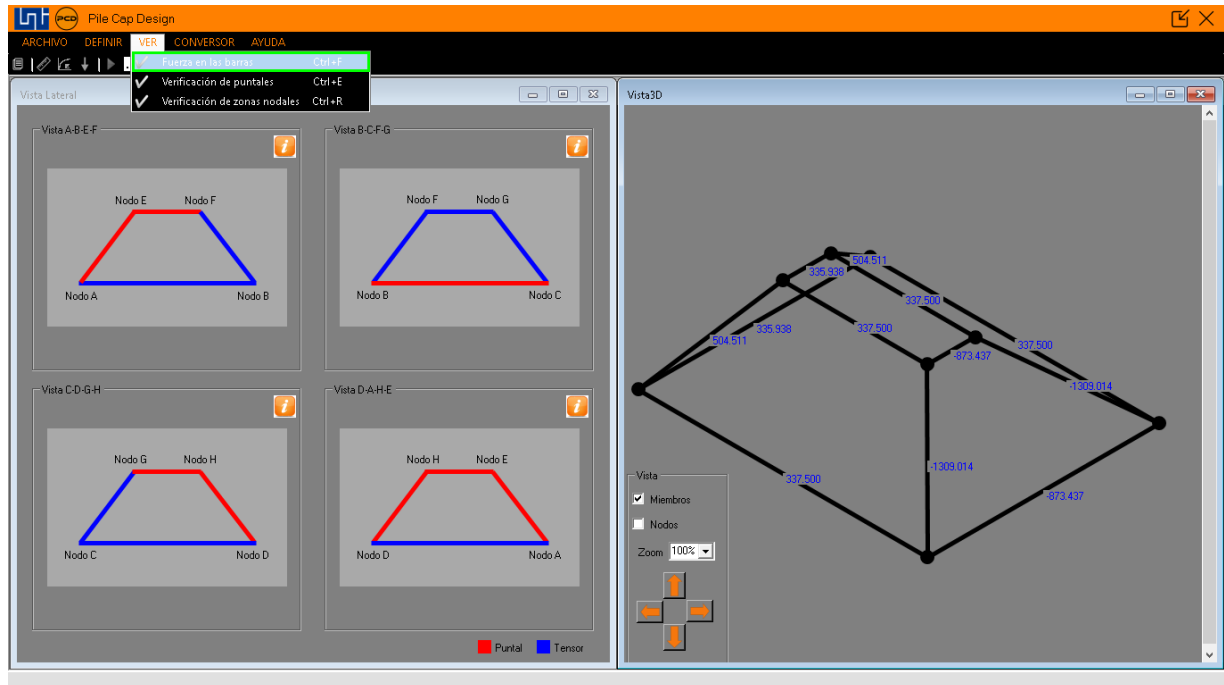


Figura 4.36. Fuerza en cada barra.

4.1.2.11.7. Verificación de puntales

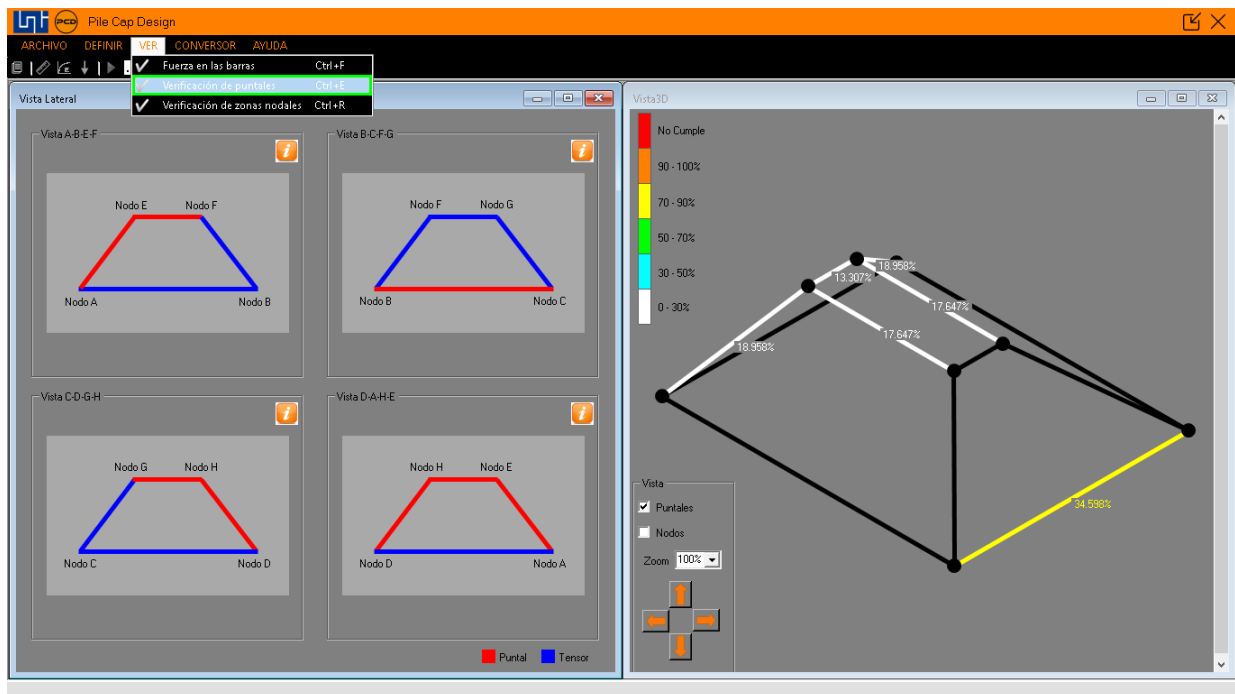


Figura 4.37. Valores de demanda capacidad para cada puntal.

4.1.2.11.8. Verificación de zona nodal

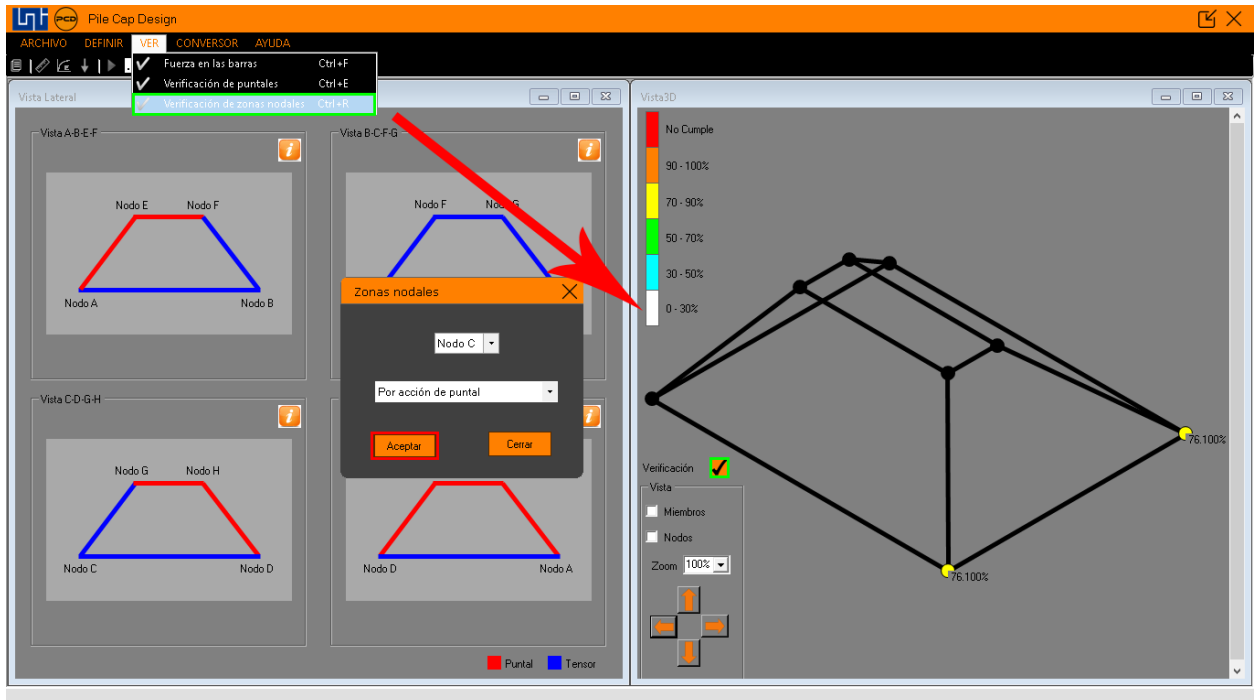


Figura 4.38. Valores de demanda capacidad para la zona nodal.

4.1.2.11.9. Refuerzo para tensores



Figura 4.39. Diseño del acero para tensores.

4.1.2.12. Comparación de resultados

4.1.2.12.1. Fuerza en los miembros del modelo

Tabla 4.15

Comparación de valores de fuerza en los miembros obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Miembros	“PCD” (kN)	Manual (kN)
M1	337.50	337.497
M2	873.437	873.436
M3	337.50	337.497
M4	335.938	335.937
M5	504.511	504.509
M6	337.50	337.497
M7	873.437	873.436
M8	337.50	337.497
M9	335.938	335.937
M10	1309.014	1309.013
M11	1309.014	1309.013
M12	504.511	504.509

4.1.2.12.2. Demanda – Capacidad de los puntales

Tabla 4.16

Comparación de los porcentajes de D/C de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Miembros	“PCD” (%)	Manual (%)
M2	34.598	34.598
M5	18.958	18.951
M6	17.647	17.647
M8	17.647	17.647
M9	13.307	13.307
M12	18.958	18.951

4.1.2.12.3. Zonas nodales

Tabla 4.17

Comparación de los porcentajes de las zonas nodales de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Nodos	Acción	“PCD” (%)	Manual (%)
A	Pilote	8.70	8.661
	Puntal de botella	9.50	9.475
	Tensor	18.40	18.382
B	Pilote	20.60	20.425
	Puntal de botella	76.10	76.116
	Tensor	32.80	32.78
C	Pilote	20.60	20.425
	Puntal de botella	76.10	76.116
	Tensor	32.80	32.78
D	Pilote	8.70	8.661
	Puntal de botella	9.50	9.475
	Tensor	18.40	18.382
E	Puntal de botella	7.60	7.58
	Puntal prismático	17.60	17.647
	Reacción	83.30	82.552
F	Puntal de botella	32.80	32.78
	Puntal prismático	76.10	76.116
	Reacción	20.60	20.425
G	Puntal de botella	32.80	32.78
	Puntal prismático	76.10	76.116
	Reacción	20.60	20.425
H	Puntal de botella	7.60	7.58
	Puntal prismático	17.60	17.647
	Reacción	83.30	82.552

4.1.2.12.4. Acero de refuerzo para tensores

Tabla 4.18

Comparación de las áreas de acero obtenidas en “PCD” y de forma manual.

Tensores	“PCD” (m^2)	Manual (m^2)
T1	0.001070	0.001071
T3	0.001070	0.001071
T4	0.001070	0.001067

De acuerdo con las tablas de comparación de resultados se puede apreciar la similitud de los mismos por lo tanto la confiabilidad de estos es alta ya que no hay una gran variación de los valores obtenidos con el software y de forma manual.

4.1.3. Ejemplo de diseño para un cabezal de 5 pilotes sometido a carga axial.

4.1.3.1. Descripción del ejemplo

Un cabezal se apoya en cinco pilotes y soporta una columna de 1×0.5 m como se muestra en la figura 4.40. Usando el método Puntal - Tensor 2D calcule el refuerzo y compruebe los nodos y puntales en el cabezal de pilotes.

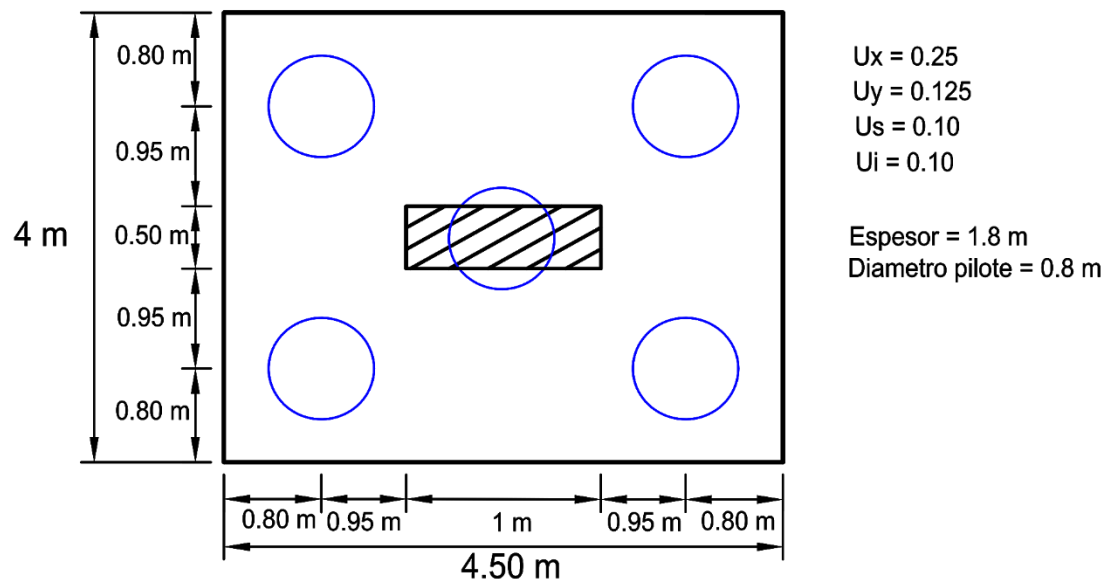


Figura 4.40. Dimensiones del cabezal.

Las propiedades principales de los materiales a utilizar se muestran a continuación:

Tabla 4.19
Datos de materiales.

<i>Materiales</i>	<i>Valor</i>
Concreto	$f_c' = 28 \text{ MPa}$
Acero	$f_y = 420 \text{ MPa}$

El cabezal estará sujeto a las siguientes solicitaciones:

Tabla 4.20
Solicitaciones actuantes.

<i>Cargas</i>	<i>Valor</i>
Peso propio	Considerado dentro del valor de la carga muerta
Carga muerta	3300 kN
Carga viva	2900 kN

4.1.3.2. Comparación de resultados

4.1.3.2.1. Fuerza en los miembros del modelo

Tabla 4.21

Comparación de valores de fuerza en los miembros obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Miembros	“PCD” (kN)	Manual (kN)
M1	1290	1290
M2	1155.625	1155.626
M3	1290	1290
M4	1155.625	1155.626
M5	2150	2150
M6	1290	1290
M7	1155.625	1155.626
M8	1290	1290
M9	1155.625	1155.626
M10	2150	2150
M11	2150	2150
M12	2150	2150
M13	1720	1720

4.1.3.2.2. Demanda – Capacidad de los puntales

Tabla 4.22

Comparación de los porcentajes de D/C de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Miembros	“PCD” (%)	Manual (%)
M5	49.526	49.526
M6	72.269	72.26
M7	64.741	64.74
M8	72.269	72.26
M9	64.741	64.74
M10	49.526	49.526
M11	49.526	49.526
M12	49.526	49.526
M13	19.272	19.27

4.1.3.2.3. Zonas nodales

Tabla 4.23

Comparación de los porcentajes de las zonas nodales de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Nodos	Acción	“PCD” (%)	Manual (%)
A	Pilote	24	23.95
	Puntal de botella	24.8	24.76
	Tensor	56.5	56.46
B	Pilote	24	23.95
	Puntal de botella	24.8	24.76
	Tensor	56.5	56.46
C	Pilote	24	23.95
	Puntal de botella	24.8	24.76
	Tensor	56.5	56.46
D	Pilote	24	23.95
	Puntal de botella	24.8	24.76
	Tensor	56.5	56.46
E	Puntal prismático	19.3	19.28
	Acción del pilote	24	23.8
F	Puntal de botella	19.8	19.81
	Puntal prismático	72.3	72.26
	Reacción	38.5	38.54
G	Puntal de botella	19.8	19.81
	Puntal prismático	72.3	72.26
	Reacción	38.5	38.54
H	Puntal de botella	19.8	19.81
	Puntal prismático	72.3	72.26
	Reacción	38.5	38.54
I	Puntal de botella	19.8	19.81
	Puntal prismático	72.3	72.26
	Reacción	38.5	38.54
J	Puntal prismático	19.3	19.28
	Reacción	38.5	38.48

4.1.3.2.4. Acero de refuerzo para tensores

Tabla 4.24

Comparación de las áreas de acero obtenidas en “PCD” y de forma manual.

Tensores	“PCD” (m^2)	Manual (m^2)
T1	0.0041	0.0041
T2	0.00367	0.003669
T3	0.0041	0.0041
T4	0.00367	0.003669

4.1.4. Ejemplo de diseño para un cabezal de 5 pilotes sometido a carga axial y momento.

4.1.4.1. Descripción del ejemplo

Un cabezal se apoya en cinco pilotes y soporta una columna de $1.5 \times 0.6m$ como se muestra en la figura 4.41. Usando el método Puntal - Tensor 2D calcule el refuerzo y compruebe los nodos y puntales en el cabezal de pilotes.

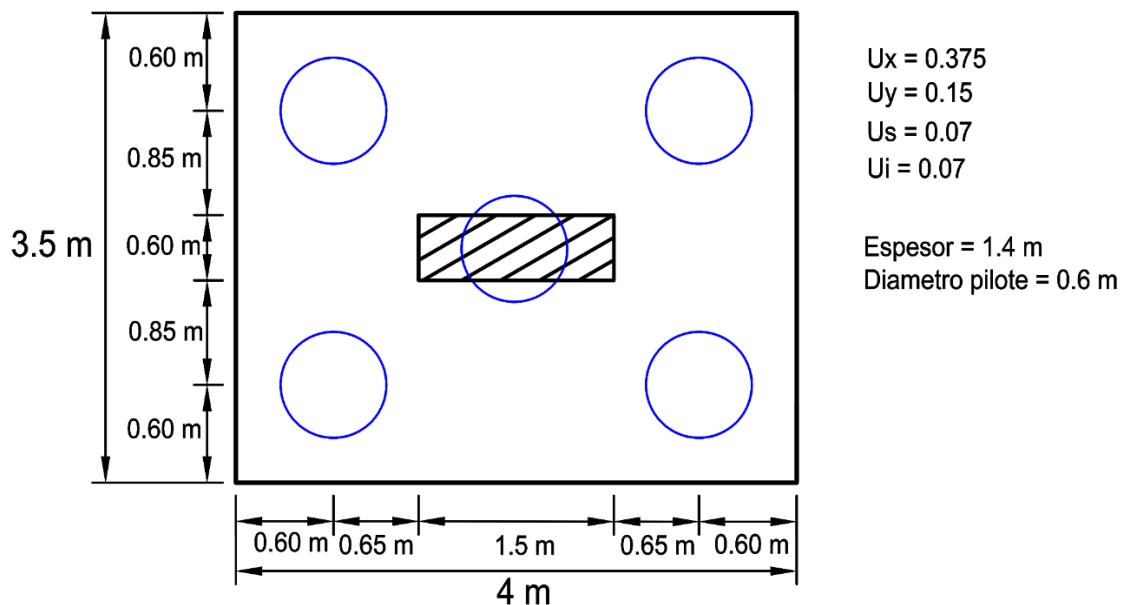


Figura 4.41. Dimensiones del cabezal.

Las propiedades principales de los materiales a utilizar se muestran a continuación:

Tabla 4.25
Datos de materiales.

Materiales	Valor
Concreto	$f_c' = 30 \text{ MPa}$
Acero	$f_y = 420 \text{ MPa}$

El cabezal estará sujeto a las siguientes solicitaciones:

Tabla 4.26
Solicitaciones actuantes.

Cargas	Valor
Peso propio	Considerado dentro del valor de la carga muerta
Carga muerta	1100 kN
Carga viva	1175 kN
Momento	4900 kN.m

4.1.4.2. Comparación de resultados

4.1.4.2.1. Fuerza en los miembros del modelo

Tabla 4.27

Comparación de valores de fuerza en los miembros obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Miembros	“PCD” (kN)	Manual (kN)
M1	138.293	138.294
M2	880.953	880.953
M3	138.293	138.294
M4	134.921	134.9206
M5	219.146	219.146
M6	138.293	138.294
M7	880.953	880.953
M8	138.293	138.294
M9	134.921	134.921
M10	1417.102	1417.102
M11	1417.102	1417.102
M12	219.146	219.146
M13	640	640

4.1.4.2.2. Demanda – Capacidad de los puntales

Tabla 4.28

Comparación de los porcentajes de D/C de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Miembros	“PCD” (%)	Manual (%)
M2	43.869	43.869
M5	8.621	8.621
M6	8.608	8.608
M8	8.608	8.608
M9	6.719	6.719
M12	8.621	8.621
M13	3.718	3.718

4.1.4.2.3. Zonas nodales

Tabla 4.29

Comparación de los porcentajes de las zonas nodales de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Nodos	Acción	“PCD” (%)	Manual (%)
A	Pilote	3.9	3.926
	Puntal de botella	4.3	4.310
	Tensor	10.8	10.761
B	Pilote	17.2	17.197
	Puntal de botella	91.40	91.3945
	Tensor	37.2	37.164
C	Pilote	17.2	17.197
	Puntal de botella	91.40	91.3945
	Tensor	37.2	37.164
D	Pilote	3.9	3.926
	Puntal de botella	4.3	4.310
	Tensor	10.8	10.761
E	Puntal prismático	3.7	3.68
	Acción del pilote	3.9	3.87
F	Puntal de botella	3.4	3.448
	Puntal prismático	8.6	8.608
	Reacción	66.7	66.680
G	Reacción	17.20	17.197
	Tensor inclinado	37.20	37.164
	Tensor horizontal	91.40	91.3945
H	Reacción	17.20	17.197
	Tensor inclinado	37.20	37.164
	Tensor horizontal	91.40	91.3945
I	Puntal de botella	3.4	3.448
	Puntal prismático	8.6	8.608
	Reacción	66.7	66.680
J	Puntal prismático	3.7	3.68
	Reacción	66.70	66.66

4.1.4.2.4. Acero de refuerzo para tensores

Tabla 4.30

Comparación de las áreas de acero obtenidas en “PCD” y de forma manual.

Tensores	“PCD” (m^2)	Manual (m^2)
T1	0.00044	0.000439
T3	0.00044	0.000439
T4	0.00043	0.000428

4.1.5. Ejemplo de diseño para un cabezal de 3 pilotes sometido a carga axial.

4.1.5.1. Descripción del ejemplo

Un cabezal se apoya en tres pilotes y soporta una columna de 0.25×0.25 m como se muestra en la figura 4.42. Usando el método Puntal - Tensor 2D calcule el refuerzo y compruebe los nodos y puntales en el cabezal de pilotes.

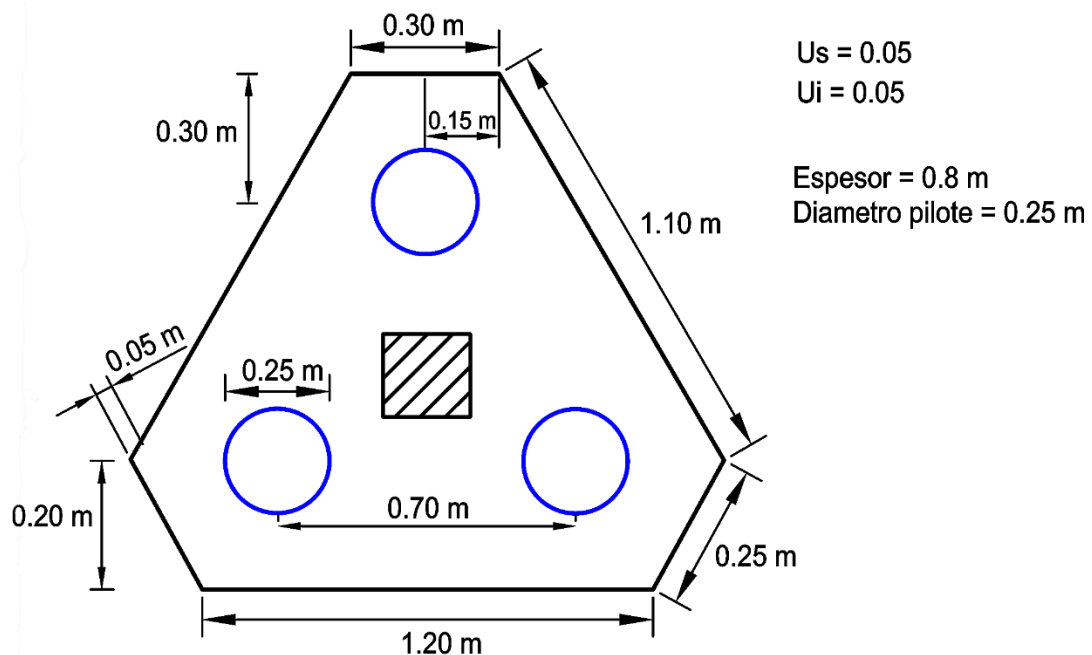


Figura 4.42. Dimensiones del cabezal.

Las propiedades principales de los materiales a utilizar se muestran a continuación:

Tabla 4.31

Datos de materiales.

Materiales	Valor
Concreto	$f_c' = 21 \text{ MPa}$
Acero	$f_y = 420 \text{ MPa}$

El cabezal estará sujeto a las siguientes solicitaciones:

Tabla 4.32

Solicitaciones actuantes.

Cargas	Valor
Peso propio	Considerado dentro del valor de la carga muerta
Carga muerta	260 kN
Carga viva	180 kN

4.1.5.2. Comparación de resultados

4.1.5.2.1. Fuerza en los miembros del modelo

Tabla 4.33

Comparación de valores de fuerza en los miembros obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Miembros	“PCD” (kN)	Manual (kN)
M1	100	100
M2	100	100
M3	100	100
M4	230.94	230.94
M5	230.94	230.94
M6	230.94	230.94

4.1.5.2.2. Demanda – Capacidad de los puntales

Tabla 4.34

Comparación de los porcentajes de D/C de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Miembros	“PCD” (%)	Manual (%)
M4	64.728	64.728
M5	64.728	64.728
M6	64.728	64.728

4.1.5.2.3. Zonas nodales

Tabla 4.35

Comparación de los porcentajes de las zonas nodales de los puntales obtenidos en “PCD” y de forma manual.

Nodos	Acción	“PCD” (%)	Manual (%)
A	Pilote	38	38.033
	Puntal de botella	32.40	32.377
	Tensor	37.70	37.748
B	Pilote	38	38.033
	Puntal de botella	32.40	32.377
	Tensor	37.70	37.748
C	Pilote	38	38.033
	Puntal de botella	32.40	32.377
	Tensor	37.70	37.748
D	Puntal de botella	25.90	25.902
	Reacción	71.70	71.709

4.1.5.2.4. Acero de refuerzo para tensores

Tabla 4.36

Comparación de las áreas de acero obtenidas en “PCD” y de forma manual.

Tensores	“PCD” (m^2)	Manual (m^2)
T1	0.00032	0.000317
T3	0.00032	0.000317
T4	0.00032	0.000317

Al analizar las comparaciones de resultados con ejemplos manuales y con el software “PCD”, se puede decir que el software es válido ya que la similitud de ambos resultados es bastante alta, lo que quiere decir que PCD cumple con la metodología del Puntal - Tensor para el diseño de cabezales de pilotes.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Mediante la descripción de fundamentos teóricos y requerimientos del método puntal-tensor mostrados en el capítulo 2 se puede afirmar que la teoría que sustenta el diseño de estructuras de concreto reforzado en base al método es aplicable al caso de cabezales de pilotes sometidos a una carga axial y momento de vuelco.
- El software PCD se desarrolló con el lenguaje de programación Visual Basic.Net, inicialmente se presentó una descripción general del entorno de desarrollo de softwares Visual Studio, este lenguaje lo consideramos como el más adecuado a nuestro criterio. El cual nos proporcionó las herramientas necesarias para crear algoritmos basados en las fórmulas vistas en el capítulo 2.
- Por último, se realizó la validación de resultados manuales y con el software, la cual determinó que la confiabilidad de los valores obtenidos es muy alta, de lo cual podemos concluir que “Pile Cap Design” es una herramienta confiable para el diseño de cabezales de pilotes de concreto reforzado.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar investigaciones alusivas al método aplicadas al diseño de cimentaciones profundas con el objetivo de ampliar las referencias de su campo de aplicación y tener un mayor grado de comprensión del mismo.
- Incentivar a retomar el desarrollo del software PCD a partir de otro lenguaje de programación ya que existen más lenguajes en los cuales se puede agregar más comandos y controles, que permitan realizar mejoras y sea fácilmente comprensible para los usuarios, de la misma manera generar la creación de nuevos softwares.
- El método Puntal-Tensor ha probado su utilidad como una herramienta consistente para el análisis y diseño de estructuras de concreto reforzado, por tal motivo recomendamos que se agregue a las normativas de construcción nacional y de igual manera en los programas de estudios de las universidades, ya que es una metodología que avanza hacia un desarrollo consistente del diseño y detallado de discontinuidades.
- Finalmente, se recomienda fomentar el estudio del método mediante el código ACI 318-19 en el que se muestra la metodología de diseño del método la cual es base fundamental para el desarrollo de PCD, de igual manera tomar en cuenta el manual de usuario que muestra la secuencia de diseño, todo esto para generar una mayor seguridad en los resultados obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- ACHE. (2003). *Método de Bielas y Tirantes*. Monografía.
- ACI. (2014). *Building Code Requeriments for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI. (2019). *Building Code Requeriments for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Aedo, M. A. (2004). *Modelo Puntal-Tensor aplicado al diseño de elementos de hormigon armado*. Universidad Austral De Chile.
- Alcocer, S. (1998). Algunas tendencias del concreto estructural . *XI Congreso Nacional de Ingenieria Estructural* , (págs. 3-27). Monterrey.
- Alcocer, S., & Uribe, C. (2000). *Comportamiento de vigas peraltadas diseñadas con el modelo de puntales y tensores* . Mexico DF.
- Arregui, D. N. (2010). *Encepado y diseño estructural en cimentaciones profundas, aplicado al proyecto puente bahía, ubicado en Bahía de Caraquez*. Pontificia Universidad Católica Del Ecuador, Quito.
- Arroyave, C. M. (2000). *Comportamiento de vigas peraltadas diseñadas con el modelo de puntales y tensores*. Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.
- ASCE-ACI 445. (1998). Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete. *Journal of Structural Engineering*, (págs. 1375-1417).
- Barney , T., & David, H. (2007). *Verification and Implementation of Strut and Tie Model in LRFD Bridge Design Specifications*. Nevada.
- Beltrán, J., & Peña, M. (2018). *Desarrollo de un modelo puntal tensor aplicado al análisis y diseño de zapatas rígidas de puentes en concreto reforzado de acuerdo con el ccp-14*. Tesis, Universidad Católica de Colombia, Facultad de ingeniería , Bogotá D.C.

- Chantelot, G., & Mathern, A. (2010). *Strut-and-tie modelling of reinforced concrete pile caps*. Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de Chalmers, Departamento de ingeniería civil y ambiental, Gotemburgo.
- Das, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (Séptima ed.). México: Cengage Learning.
- Fratelli, M. G. (1993). *Suelos, Fundaciones y Muros*. Caracas, Venezuela: Bonalde Editores.
- Gutiérrez, W., Sevilla, C., & Moreno, D. (2019). *Software para diseño de vigas apertadas de concreto reforzado aplicando el modelo Punta-Tensor según, ACI 318-14*. Universidad Nacional De Ingeniería, Facultad de tecnología de la construcción, Estelí.
- Hough Love, A. E. (1892). *A treatise on the mathematical theory of elasticity*. Inglaterra: Cambridge University Press.
- Hurtado, J. A. (2007). *Diseño de cimentaciones* (primera ed.). Perú: Fondo Editorial ICG.
- Martín, J. (2003). *Metodo de bielas y tirantes*. Madrid.
- Morales, E. (2007). *Diseño de discontinuidades en vigas de hormigon estructural con modelos puntal tensor*. Valdivia.
- Nilson, A. H. (1999). *Diseño De Estructuras De Concreto* (Duodécima ed.). (E. A. H., Ed.) Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Pascual, P. Z. (2011). *Herramienta de cálculo por el metodo de Bielas y Tirantes*. Barcelona.
- Popov, E. (1999). *Engineering Mechanics of Solids*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc .
- Quintana, R., & Rojas, A. (2013). *Análisis y diseño de vigas-cabezal para estructuras con sistemas de encofrado tipo túnel*. Tesis, Universidad Central de Venezuela , Caracas.

- Reyes, I. W. (2014). *Comparación de Esfuerzos Cortantes en Vigas de Concreto Reforzado de Gran Altura, Mediante el Método de los Elementos Finitos y el Modelo Puntal - Tensor*. Tesis de Especialidad, Universidad Nacional de Colombia , Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá. Recuperado el 25 de Julio de 2019
- Rodríguez, S. P. (2013). *Diseño y construcción de cimentaciones profundas para subestaciones eléctricas*. Trabajo de gradación, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, Facultad de Ingeniería.
- Salah El-Din E, E.-M., & Wai-Fah, C. (2017). *Structural concrete : strut-and-tie models for unified design*.
- Schlaich, J., Schafer, K., & Jennewein, M. (1987). *Toward a Consistent Design of Structural Concrete*. Reporte especial.

ANEXOS